

ANÁLISE TERMO – MECÂNICA DE UMA BARRAGEM DO TIPO GRAVIDADE

JOÃO NUNO DUARTE FERNANDES

**Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

Professor Doutor Mário Jorge de Seixas Pimentel

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e ao meu Irmão

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Mário Jorge de Seixas Pimentel que se revelou um excelente orientador ao longo deste semestre pela disponibilidade que demonstrou no esclarecimento de todas as minhas dúvidas.

Ainda ao Professor Mário Pimentel, agradeço-lhe o facto de me ter permitido a utilização do programa de elementos finitos *DIANA* na medida que, sem a utilização desta ferramenta, não seria possível a análise de diversos estudos feitos nesta dissertação.

Aos meus colegas de curso, gostaria também de exprimir o meu profundo obrigado pelo impacto que tiveram durante este meu percurso académico, ao longo destes cinco anos, e da forma como me ajudaram a ultrapassar os variados obstáculos

Por fim, porque não pode ser esquecida neste momento, um especial obrigado aos meus pais, irmão e avós que sempre me apoiaram nas minhas decisões, que me guiaram pelo caminho certo o que tornou possível a conclusão deste curso.

RESUMO

As barragens de betão, assim como outras estruturas de betão em massa que envolvem grandes quantidades de betão, têm de ser criteriosamente estudadas uma vez que as reações de hidratação do cimento são fortemente exotérmicas e libertam uma grande quantidade de calor, o que faz com que sejam atingidas temperaturas muito superiores à temperatura ambiente. Com o passar do tempo, à medida que o betão vai ganhando rigidez e com o contínuo abaixamento das temperaturas, geram-se tensões de tração que devem ser cuidadosamente estudadas de forma a avaliar o risco de fendilhação. Face a estas condições, torna-se então fundamental estudar o faseamento construtivo para avaliar a sua melhor solução não colocando em risco os rendimentos de obra e os prazos de execução.

Neste trabalho foi utilizado o método dos elementos finitos para a determinação dos campos de temperaturas numa barragem gravidade em betão e para a avaliação da evolução do seu estado de tensão. A análise tem em conta a evolução da temperatura ambiente, a temperatura do betão no instante da colocação, a produção de calor do betão durante a hidratação e a evolução das propriedades mecânicas do betão com o tempo.

Após a descrição dos modelos utilizados e dos fenómenos intervenientes, foi efetuado um estudo paramétrico com o objetivo de estudar a influência de vários parâmetros (tais como o tempo de espera de betonagem entre camadas, espessura das camadas, temperatura de colocação e variação da temperatura exterior), na evolução das temperaturas. Neste estudo paramétrico foi considerado um betão com uma baixa quantidade de cimento de forma a simular o núcleo de uma barragem. Foram tidas em conta neste estudo paramétrico propriedades térmicas tais como a condutibilidade térmica, curva adiabática de temperaturas, o calor específico e o coeficiente de convecção.

Após este estudo paramétrico, prosseguiu-se então à análise termo – mecânica da barragem de gravidade. Neste estudo, imposto já o ritmo de betonagem, foram avaliadas as temperaturas e as tensões desenvolvidas. Relativamente à análise térmica, as propriedades térmicas foram similares às utilizadas no estudo paramétrico com acréscimo das propriedades térmicas para o betão de face que apresenta uma maior quantidade de cimento. No que respeita à análise mecânica, foram tidas em conta as propriedades evolutivas mecânicas em função da maturidade e foram adotadas leis de fluência seguindo a formulação da lei da dupla potência.

Os resultados da análise termo – mecânica, dada a imposição do faseamento construtivo, mostram que nas zonas onde há uma maior quantidade de cimento e maior restrição, como é o caso da base da barragem, o valor de f_{ctm} é ultrapassado pelo que será expectável a ocorrência de fendilhação nesta zona. A zona do núcleo não é afetada durante o faseamento construtivo uma vez que o f_{ctm} não é ultrapassado. Na zona do coroamento, também ela betonada com um betão mais rico em cimento, mostra que durante o faseamento construtivo, o risco de fendilhação no seu interior é muito reduzido.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Gravidade, Fendilhação, Faseamento Construtivo, Método dos Elementos Finitos, Análise Termo – Mecânica.

ABSTRACT

The concrete dams, like other structures of concrete mass which involve large amounts of concrete must be studied carefully since the cement hydration reactions are strongly exothermic and releases a large amount heat, which makes them reached temperatures well above room temperature. With the passage of time as the concrete is gaining stiffness and with continuous lowering of temperatures, are generated tensile stresses which must be carefully studied to evaluate the risk of cracking. Given these conditions it becomes essential to study the constructive phasing to see the best solution not endangering income from work and deadlines.

In this work it was used the finite element method to obtain the temperature fields in a concrete gravity dam in order to assess the evolution of his tension. The analysis took into account the evolution of the ambient temperature, the temperature at the time of concrete placement, heat production of concrete during the hydration and the evolution of the mechanical properties of the concrete with time

After the description of the models and the intervening events, a parametric study was conducted with the aim of studying the influence of many parameters (such as the waiting time between concreting layers, layer thickness, temperature setting and variation of temperature), on the evolution of temperatures. In this parametric study was considered a concrete with a low amount of cement to simulate the core of a dam. Thermal properties such as thermal conductivity, adiabatic temperature curve, the specific heat and the convection coefficient have been taken into account in the parametric study.

After the parametric study, it was preceded to the thermo-mechanical analysis of gravity dam. In this study, with the rate of concreting imposed, the temperatures and the stresses developed was measured. In what concerns the thermal analysis, the thermal properties were similar to those used in the parametric study with the addition of the thermal properties on the face concrete, which presents a greater quantity of cement. As regards the mechanical analysis, it was taken into account mechanical properties evolution as a function of maturity and laws of fluency following the formulation of double power law.

The results of thermo mechanical analysis, given by the imposition of constructive phase show that in areas where there is a greater amount of cement and greater restriction, such as the base of the dam, the f_{ctm} value is exceed which is expected the occurrence of cracking in this zone. The area of the core is not affected during the phase construction which means that the f_{ctm} value is not exceeded. On the crown area, which was also concreted with richer concrete cement, shows that during the construction phasing, the risk of cracking in the interior is very low.

KEYWORDS: Gravity Dam, Cracking, Constructive Phasing, Finite Element Method, Thermo-mechanical Analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1 INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	1
 2 PROBLEMA TÉRMICO E MECÂNICO.....	 3
2.1. PROBLEMA TÉRMICO	3
2.1.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
2.1.3. CONDUÇÃO.....	4
2.1.3.1. GRANDEZAS INTERVENIENTES.....	5
2.1.3.2. EQUAÇÃO DE FOURIER	5
2.1.4. CONVECÇÃO	7
2.1.4.1. LEI DE NEWTON.....	7
2.1.5. RADIAÇÃO	9
2.1.5.1. ABORDAGEM DA LEI DE NEWTON NO PROCESSO DA RADIAÇÃO	9
2.1.5.2. RADIAÇÃO SOLAR	10
2.1.6. CALOR DE HIDRATAÇÃO	12
2.1.6.1. DETERMINAÇÃO DA GERAÇÃO POTENCIAL DE CALOR	13
2.1.6.2 ADIÇÕES PARA REDUÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO	13

2.1.7. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA.....	14
2.2. PROBLEMA MECÂNICO	15
2.2.1. INTRODUÇÃO	15
2.2.2. GRAU DE HIDRATAÇÃO E MATURIDADE	16
2.2.3. MATURIDADE	16
2.2.3.1. PROPRIEDADES EVOLUTIVAS DO BETÃO	18
2.2.4. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA E COEFICIENTE DE POISSON	19
2.2.5 FLUÊNCIA	20
2.2.5.1. FUNÇÃO FLUÊNCIA.....	20
2.2.5.2. FORMULAÇÃO DA FLUÊNCIA.....	20
2.2.6 RETRAÇÃO	21
2.2.6.1. RETRAÇÃO DE SECAGEM.....	21
2.2.6.2. RETRAÇÃO AUTOGÊNEA.....	21
 3 METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS EM ESTRUTURAS	
DE BETÃO EM MASSA.....	23
3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. BETÃO EM MASSA.....	23
3.3. METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS.....	23
3.3.1. USO DE CIMENTOS ESPECIAIS.....	24
3.3.2. DIMENSÃO DO AGREGADO	24
3.3.3. COFRAGEM	24
3.3.4. PRÉ E PÓS ARREFECIMENTO DO BETÃO.....	24
3.3.5. RITMOS DE BETONAGEM.....	25

3.3.6. ESPAÇAMENTO DAS JUNTAS.....	25
3.4. BARRAGENS DE GRAVIDADE	26
3.4.1. SISTEMAS CONSTRUTIVOS ADOTADOS PARA BARRAGENS DE GRAVIDADE.....	27
3.4.1.1. BETÃO EM MASSA CONVENCIONAL.....	27
3.4.1.2. BETÃO COMPACTADO COM CILINDROS (BCC)	28
3.4.2. ÁREAS ENVOLVIDAS NO PROJETO	28
3.4.3. AÇÕES ATUANTES NAS BARRAGENS DE GRAVIDADE.....	28
4 ESTUDO PARAMÉTRICO	31
4.1 OBJETIVO	31
4.2. MODELO BASE.....	31
4.2.1. MALHA	32
4.2.2. ESTUDOS PARAMÉTRICOS.....	33
4.2.3 ESTUDO BASE.....	35
4.2.4. VARIANTE MUDANÇA DA ALTURA DE BETONAGEM DA CAMADA	35
4.2.5. VARIANTE MUDANÇA DO TEMPO DE ESPERA	38
4.2.6. VARIAÇÃO DA ALTURA DE BETONAGEM DA CAMADA E DO TEMPO DE ESPERA	40
4.2.7 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA INTERIOR	42
4.2.8. EFEITO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO-RADIAÇÃO	43
4.2.9. VARIANTE CONDIÇÕES EXTREMAS	45
4.2.10 VARIANTE RADIAÇÃO SOLAR	50
5 CASO DE ESTUDO.....	63
5.1. INTRODUÇÃO	63

5.2. MODELO DA BARRAGEM	64
5.2.1. GEOMETRIA DA BARRAGEM	64
5.2.2. FASEAMENTO CONSTRUTIVO	65
5.2.3. TIPO DE ANÁLISE E MALHA USADA	65
5.2.4. APOIOS	66
5.3. MATERIAIS	67
5.3.1. PROPRIEDADES EVOLUTIVAS DO BETÃO	67
5.3.1.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS	67
5.3.1.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS	68
5.3.2. FLUÊNCIA	69
5.3.3. RETRACÇÃO	69
5.3.4. FUNDAÇÃO	69
5.4. ACÇÕES	70
5.4.1. TEMPERATURA INTERIOR E EXTERIOR	70
5.4.2. GRAVIDADE	71
5.5. RESULTADOS DA ANÁLISE TERMO-MECÂNICA DO MODELO	71
5.5.1. ZONA DA BASE DA BARRAGEM	72
5.5.2. ZONA DO NÚCLEO DA BARRAGEM	75
5.5.3. ZONA DO COROAMENTO DA BARRAGEM	79
5.6. MEDIDAS PREVENTIVAS A TER NA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS	86
6 CONCLUSÃO	89
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	89
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	91

BIBLIOGRAFIA	93
---------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Imagem ilustrativa das trocas de calor numa barragem(Coelho, N.d.A., 2012).	4
Fig. 2.2 - Elemento volúmico 3D infinitesimal(Azenha, M.Â.D., 2004).	5
Fig.2.3 - Velocidade e temperatura do fluido na vizinhança do sólido(Azenha, M.Â.D., 2004).	8
Fig. 2.4 - Incidência dos raios solares numa superfície inclinada(Azenha, M.Â.D., 2009).	11
Fig.2.5 - Evolução das propriedades mecânicas do betão de acordo com a idade equivalente(Azenha, M.Â.D., 2009).	19
Fig.2.6 - Desenvolvimento da retração autogénea e de secagem para betões normais (NSC) e de alto desempenho (HPC) (Azenha, M.Â.D., 2004).	21
Fig.3.1- Imagem ilustrativa de uma secção de um bloco com descarregador(ENGINEERS, U.S.A.C.E., 1995).	26
Fig. 3.2- Imagem ilustrativa de uma secção não galgável(ENGINEERS, U.S.A.C.E., 1995).	27
Fig.4.1- Curva adiabática correspondente ao teor de ligante e percentagem de cinzas referido.	31
Fig.4.2- Geometria do modelo base.	32
Fig. 4.3- Visualização da malha geral do modelo base (adaptado do DIANA).	33
Fig. 4.4- Visualização da zona dos elementos da superfície convectiva a vermelho (adaptado do DIANA).	33
Fig. 4.5- Evolução das temperaturas da camada central na zona da base, na zona intermédia e na zona de topo.	35
Fig.4.6- Evolução das temperaturas considerando a espessura da camada a 2.5m.	36
Fig.4.7- Evolução das temperaturas considerando a espessura da camada a 3.0m.	36
Fig.4.8- Evolução das temperaturas na zona da base da camada variando as espessuras.	37
Fig.4.9- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada variando as espessuras.	37
Fig. 4.10- Evolução das temperaturas na zona topo da camada variando as espessuras.	37
Fig.4.11- Evolução das temperaturas considerando um tempo de espera de 5 dias.	38
Fig.4.12- Evolução das temperaturas considerando um tempo de espera de 7 dias.	38
Fig.4.13- Evolução das temperaturas na zona da base da camada variando o tempo de espera.	39
Fig.4.14- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada variando o tempo de espera.	39
Fig.4.15- Evolução das temperaturas na zona de topo da camada variando o tempo de espera.	39
Fig.4.16- Evolução das temperaturas considerando uma variação da espessura de 2,5m e um tempo de espera de 5 dias.	40
Fig. 4.17- Evolução das temperaturas considerando uma variação da espessura de 3,0m e um tempo de espera de 7 dias.	40
Fig.4.18- Evolução das temperaturas na zona da base da camada.	41
Fig.4.19- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada.	41

Fig.4.20- Evolução das temperaturas na zona de topo da camada.	41
Fig.4.21- Evolução das temperaturas para uma temperatura de colocação de 10°C.	42
Fig.4.22- Evolução das temperaturas na zona da base da camada.	42
Fig.4.23- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada.	43
Fig.4.24- Evolução das temperaturas na zona de topo da camada.	43
Fig.4.25- Comparação entre h_c e h_{cr} na zona base da camada.	44
Fig.4.26- Comparação entre h_c e h_{cr} na zona intermédia da camada.	44
Fig.4.27- Comparação entre h_c e h_{cr} na zona topo da camada.	44
Fig.4.28- Evolução das temperaturas numa situação de inverno.....	45
Fig.4.29- Evolução das temperaturas numa situação de verão.	45
Fig.4.30- Evolução das temperaturas diárias no inverno.	47
Fig.4.31- Evolução das temperaturas diárias no verão.	47
Fig.4.32- Evolução das temperaturas considerando a sinusoide no inverno.	47
Fig.4.33- Evolução das temperaturas considerando a sinusoide no verão.	48
Fig.4.34- Evolução das temperaturas na zona base da camada com e sem sinusoide.	48
Fig.4.35- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada com e sem sinusoide.	49
Fig.4.36- Evolução das temperaturas na zona topo da camada com e sem sinusoide.....	49
Fig.4.37- Evolução das temperaturas na zona base da camada com e sem sinusoide.	49
Fig.4.38- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada com e sem sinusoide.	50
Fig.4.39- Evolução das temperaturas na zona topo da camada com e sem sinusoide.....	50
Fig.4.40- Fluxo de calor devido à radiação no inverno com céu limpo.....	51
Fig.4.41- Fluxo de calor devido à radiação solar no inverno com céu nublado.....	51
Fig.4.42- Fluxo de calor devido à radiação solar no verão com céu limpo.....	52
Fig.4.43- Fluxo de calor devido à radiação solar no verão com céu nublado.	52
Fig.4.44- Evolução das temperaturas numa situação de inverno considerando a radiação solar para céu limpo.	53
Fig.4.45- Evolução das temperaturas numa situação de inverno considerando a radiação solar para céu nublado.	53
Fig.4.46- Evolução das temperaturas numa situação de verão considerando a radiação solar para céu limpo.	54
Fig.4.47- Evolução das temperaturas numa situação de verão considerando a radiação solar para céu nublado.	54
Fig.4.48- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	55
Fig.4.49- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	55

Fig.4.50- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	56
Fig.4.51- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	56
Fig.4.52- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	57
Fig.4.53- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	57
Fig.4.54- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	58
Fig.4.55- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	58
Fig.4.56- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	59
Fig.4.57- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	59
Fig.4.58- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	60
Fig.4.59- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.....	60
Fig.4.60- Evolução das temperaturas para uma nova temperatura média.	61
Fig.4.61- Comparação entre as temperaturas da zona base da camada para a situação com radiação solar e com a temperatura média alterada.	61
Fig.4.62- Comparação entre as temperaturas da zona intermédia da camada para a situação com radiação solar e com a temperatura média alterada.....	62
Fig.4.63- Comparação entre as temperaturas da zona topo da camada para a situação com radiação solar com a temperatura média alterada.	62
Fig.5.1- Parte da planta do aproveitamento hidroelétrico.	63
Fig.5.2- Secção transversal com a geometria do bloco analisado.	64
Fig.5.3- a) Galeria de cabos; b) Galeria de drenagem (dimensões em metros).	64
Fig.5.4- Camadas de betonagem da barragem.	65
Fig.5.5- Malha de elementos finitos usada para o modelo termo - mecânico.	66
Fig.5.6- Apoios utilizados para a análise mecânica do modelo.....	66
Fig.5.7- Curva adiabática correspondente ao betão C25.....	67
Fig.5.8- Evolução da resistência à tração do betão.	68
Fig.5.9- Evolução do módulo de elasticidade.....	69
Fig.5.10- Evolução das temperaturas ao longo do ano.....	71

Fig.5.11- Zona de análise da base da barragem.....	72
Fig.5.12- Evolução da temperatura e de σ_x	72
Fig.5.13- Evolução da temperatura e de σ_z	73
Fig.5.14- Evolução da temperatura e de σ_x	73
Fig.5.15- Evolução da temperatura e de σ_z	73
Fig.5.16- Evolução da temperatura e de σ_x	74
Fig.5.17- Evolução da temperatura e de σ_z	74
Fig.5.18- Evolução da temperatura e de σ_x	74
Fig.5.19- Evolução da temperatura e de σ_z	75
Fig.5.20- Zona de análise do núcleo.	76
Fig.5.21- Evolução da temperatura e de σ_x	76
Fig.5.22- Evolução da temperatura e de σ_z	77
Fig.5.23- Evolução da temperatura e de σ_x	77
Fig.5.24- Evolução da temperatura e de σ_z	77
Fig.5.25- Evolução da temperatura e de σ_x	78
Fig.5.26- Evolução da temperatura e de σ_z	78
Fig.5.27- Zonas de análise no coroamento.	79
Fig.5.28- Evolução da temperatura e de σ_x	80
Fig.5.29- Evolução da temperatura e de σ_z	80
Fig.5.30- Evolução da temperatura e de σ_x	80
Fig.5.31- Evolução da temperatura e de σ_z	81
Fig.5.32- Evolução da temperatura e de σ_x	81
Fig.5.33- Evolução da temperatura e de σ_z	81
Fig.5.34- Evolução da temperatura e de σ_x	82
Fig.5.35- Evolução da temperatura e de σ_z	82
Fig.5.36- Evolução da temperatura e de σ_x	83
Fig.5.37- Evolução da temperatura e de σ_z	83
Fig.5.38- Evolução da temperatura e de σ_x	83
Fig.5.39- Evolução da temperatura e de σ_z	84
Fig.5.40- Evolução da temperatura e de σ_x	84
Fig.5.41- Evolução da temperatura e de σ_z	84
Fig.5.42- Evolução da temperatura e de σ_x	85
Fig.5.43- Evolução da temperatura e de σ_z	85
Fig.5.44- Evolução das temperaturas na superfície e no interior da camada.	86

Fig.5.45- Evolução das temperaturas na superfície e no interior da camada.	86
Fig.5.46- Evolução das temperaturas na superfície e no interior da camada.	87
Fig.5.47- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.	87
Fig.5.48- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.	87
Fig.5.49- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.	88
Fig.5.50- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.	88

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1- Estudos efetuados neste modelo.....	34
Quadro 4.2- Parâmetros da senoide para o inverno.....	46
Quadro4.3- Parâmetros da senoide para o verão.	46
Quadro 4.4- Dados para o cálculo da radiação solar no inverno.	51
Quadro4.5- Dados para o cálculo da radiação solar no verão.	51
Quadro5.1- Propriedades térmicas do betão.	67
Quadro5.2- Propriedades mecânicas aos 28 dias usadas para o betão C25.	68
Quadro5.3- Propriedades mecânicas aos 28 dias usadas para o betão C15.	68
Quadro5.4- Parâmetros usados para a barragem.....	69
Quadro5.5- Propriedades adotadas para a fundação.	70
Quadro5.6- Parâmetros usados para a curva de temperaturas anual.	70
Quadro5.7- Novos parâmetros a ter em conta após a consideração do efeito da radiação solar.	71

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O objetivo deste trabalho é a análise termo – mecânica de um bloco da barragem de gravidade em betão do Aproveitamento Hidroelétrico de Ilisu na Turquia, com vista ao estabelecimento do estado de tensão durante a fase construtiva e a avaliação do risco de fendilhação. O bloco tem cerca de 45m de altura e apresenta um núcleo de betão com baixo teor de cimento, característico das estruturas de betão em massa, e com uma camada superficial com um betão mais rico.

A zona em que a barragem se insere, é bastante exigente do ponto de vista climático, pelo que o controlo das temperaturas do betão durante a fase construtiva assume especial importância. Trata-se de uma zona muito árida, onde as temperaturas podem descer aos 5°C durante o inverno e subir aos 45°C durante o verão.

Foi utilizado o método dos elementos finitos para a determinação dos campos de temperaturas na barragem e para a avaliação da evolução do seu estado de tensão. A análise tem em conta a evolução da temperatura ambiente, a temperatura do betão no instante da colocação, a produção de calor do betão durante a hidratação e a evolução das propriedades mecânicas do betão com o tempo.

1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação está organizada em seis capítulos sendo que o primeiro corresponde à introdução e o último à conclusão.

O segundo capítulo, aborda numa primeira parte o problema térmico em que são explicadas de uma forma geral as formas de transmissão de calor e as propriedades térmicas do betão. São ainda descritas de forma sucinta as formas de modelar o desenvolvimento, o calor de hidratação e as formulações numéricas utilizadas.

A segunda parte deste segundo capítulo aborda o problema mecânico, assumido desacoplado do primeiro, onde são apresentadas as definições das propriedades elásticas evolutivas em função da maturidade, e se descrevem a formulação utilizada para a fluência.

No terceiro capítulo são abordadas algumas metodologias construtivas implementadas neste tipo de estruturas e a forma como estas influenciam a evolução das temperaturas. É ainda feita referência a estruturas de betão em massa, tipos de betão usados em barragens de gravidade e ações a que geralmente estas barragens estão sujeitas.

No quarto capítulo, é feito um estudo paramétrico com um modelo simples que visa a reprodução das evoluções da temperatura no núcleo de uma barragem. Este estudo foi feito com auxílio ao programa de elementos finitos *DIANA* e foi avaliada a influência de vários parâmetros na evolução das temperaturas.

No quinto capítulo, apresenta-se o caso de estudo da barragem de gravidade. Previamente, são apresentadas as várias considerações feitas na elaboração deste modelo (geometria, faseamento construtivo, materiais, malha, apoios, propriedades térmicas e mecânicas, fluência e retração, temperatura de colocação, temperatura exterior e ações). Após a apresentação destas condições, segue-se por fim a discussão e apresentação dos resultados.

2

PROBLEMA TÉRMICO E MECÂNICO

2.1. PROBLEMA TÉRMICO

2.1.1. INTRODUÇÃO

O controlo das temperaturas numa estrutura em massa é necessário para evitar a fendilhação causada por tensões que se podem instalar devido às diferenças de temperatura que se geram no betão.

O carácter exotérmico das reações de hidratação do cimento é a razão da libertação de calor que ocorre durante as primeiras idades do betão. Devido às propriedades do betão, as temperaturas podem chegar a valores bastante elevados necessitando especial atenção e controlo.

No presente capítulo serão abordados os tipos de transmissão de calor, pelo que se começará pela abordagem à condução, em que se irá definir o seu conceito geral, grandezas intervenientes e a dedução da equação de Fourier. De seguida, ainda dentro dos métodos de transmissão de calor, será feita também referência às condições fronteira, convecção e radiação, em que se fará uma breve definição dos conceitos e a forma de como os mesmos são incorporados dentro do campo das estruturas de betão.

Dentro do calor de hidratação, destaque para os ensaios que são usados para a determinação da geração potencial de calor, sendo dado mais relevo ao da calorimetria adiabática, visto que é o que irá ser usado no caso de estudo, e também uma pequeno enfoque aos tipos de adições que são mais usados para a redução do calor de hidratação.

Por fim, uma abordagem também para o tratamento numérico do problema em que se apresentam as equações de condução e convecção-radiação na forma discreta, tal como são tratadas pelo método dos elementos finitos.

2.1.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A transferência de calor consiste na transferência de energia térmica devido a diferenças de temperatura. A transmissão de calor entre dois elementos verifica-se sempre que se estabelece uma diferença de temperaturas e faz-se no sentido do elemento a temperatura mais elevada para o de temperatura mais baixa e com conservação de energia.

Admitem-se três processos de transmissão de calor: a condução - transmissão de calor entre corpos sólidos e no seu interior; convecção – forma de transmissão de calor no interior de um

fluido ou entre um fluido e uma superfície sólida; e radiação – neste tipo de transmissão não é necessário qualquer tipo de suporte material pelo que o calor é transferido por radiações eletromagnéticas (de acordo com a teoria de Maxwell) ou através de fótons discretos (hipótese de Plank).

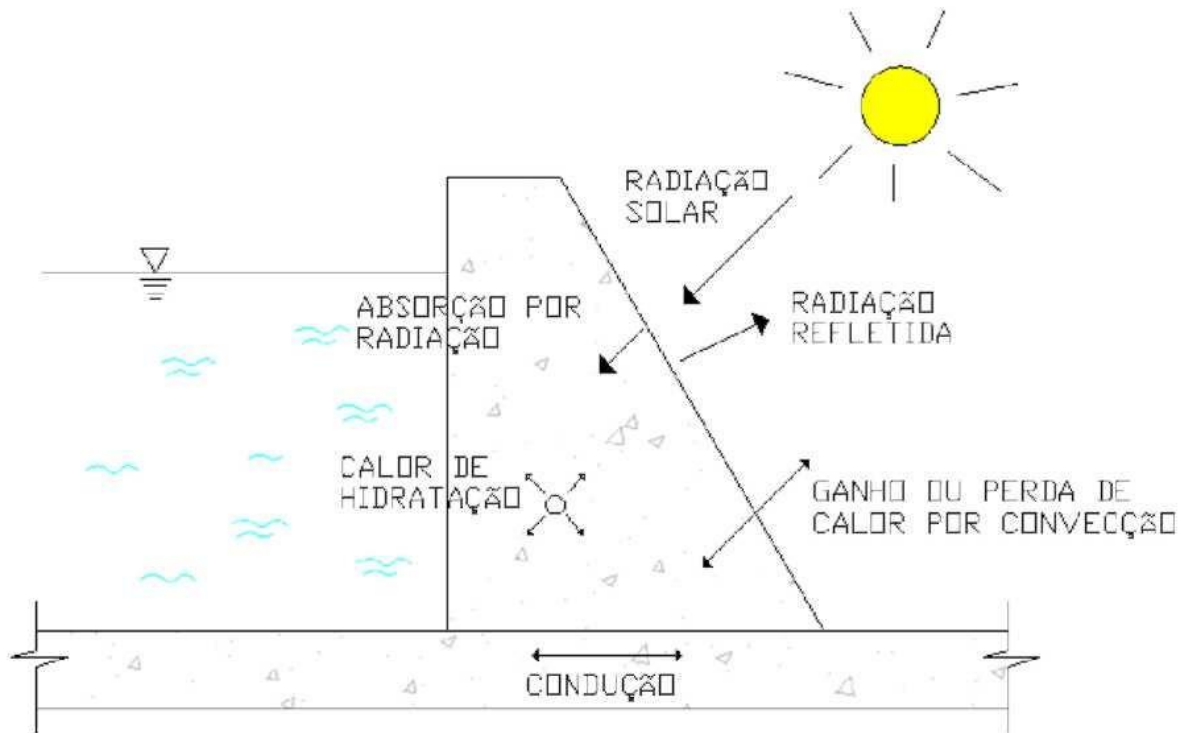


Fig. 2.1 Imagem ilustrativa das trocas de calor numa barragem(Coelho, N.d.A., 2012).

2.1.3. CONDUÇÃO

A condução do calor processa-se por uma troca de energia calorífica entre corpos em contacto direto ou partes de um mesmo corpo a diferentes temperaturas. A lei fundamental que rege a transmissão do calor por condução é conhecida por lei de Fourier. De acordo com esta lei, a quantidade de calor que passa através de uma área A (normal à direção do fluxo calorífico) na unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico(Silveira, A.F.d., 1961, Teles, M.M.M.S., 1986).

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

Em que:

$\frac{\partial q}{\partial t}$ – quantidade de calor que atravessa a área A na unidade de tempo,

A - área atravessada pelo fluxo de calor (m²),

K - condutibilidade térmica (W/m.K),

$\frac{\partial T}{\partial x}$ – gradiente térmico.

A condução do calor pode ocorrer em regime permanente, em que a temperatura não varia com o tempo, ou em regime variável, na qual a temperatura varia com o tempo.

2.1.3.1. GRANDEZAS INTERVENIENTES

Para introdução do fenómeno de condução em condições de regime variável, será necessário a definição de alguns conceitos tais como: calor específico, condutibilidade térmica (sendo esta também necessária em regime estacionário), calor específico volumétrico (ou capacidade calorífica) e difusibilidade térmica.

O calor específico é a quantidade de calor necessário para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um corpo. O calor específico é designado pela letra c e é expresso em J/(Kg.K).

A condutibilidade térmica k é a quantidade de calor que passa perpendicularmente através de uma unidade de superfície de uma substância, por unidade de tempo aquando da existência de uma variação de temperatura entre duas superfícies.

O calor específico volumétrico é dado pelo produto entre o calor específico c e a massa específica ρ do material sendo que representa a capacidade que o material tem para armazenar energia. As unidades que se exprime são J/(m³.K).

A difusibilidade térmica é dada pelo quociente entre a condutibilidade térmica e o calor específico volumétrico. É dado pela letra α_T e exprime-se em m²/s.

2.1.3.2. EQUAÇÃO DE FOURIER

Para auxílio da dedução da equação, considere-se o seguinte volume infinitesimal elementar representado na figura 2.2.

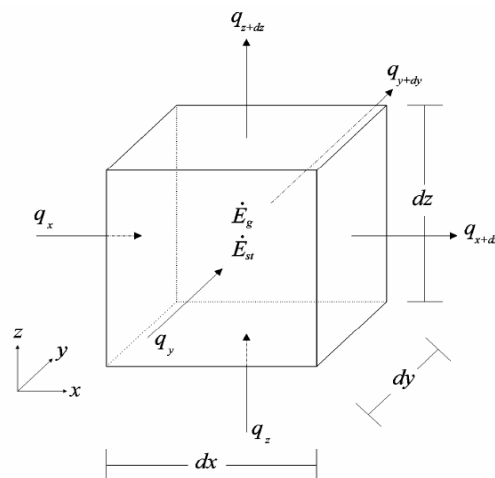


Fig. 2.2 - Elemento volúmico 3D infinitesimal(Azenha, M.Â.D., 2004).

Na presença de gradientes térmicos, haverá condução de calor através das faces da partícula infinitesimal, em direções perpendiculares as superfícies (Azenha, M.Â.D., 2004).

Considerando os fluxos, q_x , q_y e q_z , em três faces da partícula infinitesimal, tem-se que nas faces opostas:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx; \quad q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy; \quad q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.2)$$

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, sabe-se que a Energia que entra mais a energia gerada é igual a energia que sai mais a energia armazenada. Logo:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.3)$$

em que:

$$\dot{E}_g = \dot{Q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.4)$$

$$\dot{E}_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.5)$$

E_{in} – taxa de entrada de energia

E_{out} – taxa de saída de energia

E_g – taxa de geração de energia

E_{st} – taxa de armazenamento de energia

Q – taxa de geração de energia por unidade de volume

t – tempo(s)

No entanto, sabe-se que:

$$\dot{E}_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (2.6)$$

$$\dot{E}_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (2.7)$$

Substituindo (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8) em (2.4) fica:

$$q_x + q_y + q_z + \dot{Q}.dx.dy.dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c \frac{dT}{dt}.dx.dy.dz \quad (2.8)$$

Substituindo as expressões em (2.3) em (2.9) obtém-se:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}.dx - \frac{\partial q_y}{\partial y}.dy - \frac{\partial q_z}{\partial z}.dz + \dot{Q}.dx.dy.dz = \rho c \frac{dT}{dt}.dx.dy.dz \quad (2.9)$$

Recorrendo à expressão (2.1) e considerando um material isotrópico:

$$q_x = -k.dy.dz.\frac{dT}{dx}; \quad q_y = -k.dx.dz.\frac{dT}{dy}; \quad q_z = -k.dx.dy.\frac{dT}{dz} \quad (2.10)$$

Substituindo as expressões (2.11) tem-se que a expressão geral da equação de Fourier é:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} + \frac{\dot{Q}}{k} = \frac{1}{\alpha_T} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.11)$$

2.1.4. CONVECÇÃO

Como foi referido no subcapítulo 2.1.2, convecção é um mecanismo de transferência de calor entre um meio sólido e um fluido em movimento.

A convecção pode ser classificada como convecção livre ou natural e por convecção forçada sendo que na convecção forçada, o fluido flui ao longo de uma superfície ou de um tubo através de meios exteriores tais como bombas, ventiladores e o vento enquanto que na convecção livre, o movimento do fluido é causado por meios naturais tais como efeitos de flutuação, que se manifesta através de diferenças de densidade no fluido ocorrido devido a diferenças de temperatura (Çengel, Y.A. and Ghajar, A.J., 2011).

2.1.4.1. LEI DE NEWTON

Apesar da complexidade do mecanismo de transferência por convecção, observa-se que o grau de transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura e é expresso pela Lei de Newton. A sua expressão é conhecida por:

$$q = h_{conv} \times A \times (T_s - T_f) \quad (2.12)$$

q – fluxo do calor transmitido entre o sólido e o fluido (W);

h_{conv} – coeficiente de convecção (W/m².K);

A – área da superfície do sólido através da qual se dão as trocas de calor;

T_s – Temperatura do sólido;

T_f – Temperatura do fluido.

Apesar da simplicidade da fórmula, o coeficiente de convecção está fortemente dependente de várias variáveis tais como a viscosidade dinâmica, condutividade térmica, densidade, calor específico tal como a velocidade do fluido sendo por isso um parâmetro de difícil quantificação.

O valor de h_{conv} não depende da diferença de temperatura entre o sólido e o fluido para convecção forçada mas é função dessa diferença quando se trata de convecção natural.

Quando um fluido flui sobre uma superfície sólida (impermeável), é constatado que o fluido em movimento assume velocidade zero nessa mesma superfície. No que respeita à temperatura, quando dois corpos a diferentes temperaturas estão ambos em contacto, a transferência de calor que ocorre entre ambos os corpos assume a mesma temperatura no ponto de contacto. Logo, a temperatura entre a superfície do sólido e o fluido irão ter a mesma temperatura no ponto de contacto (Çengel, Y.A. and Ghajar, A.J., 2011).

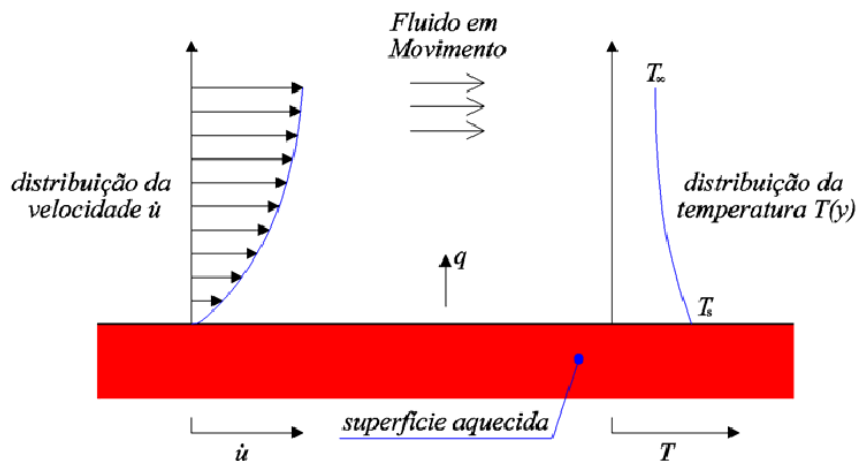


Fig.2.3 - Velocidade e temperatura do fluido na vizinhança do sólido (Azenha, M.Â.D., 2004).

Como já foi acima referido, o valor do coeficiente de convecção depende de várias variáveis pelo que a sua determinação pode ser efetuada por via analítica ou recorrendo a correlações empíricas.

No que diz respeito aos valores de h_{conv} a adotar no cálculo de campos térmicos no betão, é usual a adoção da formulação empírica referenciada em Jonasson. Esta formulação estabelece o coeficiente de transmissão térmica para uma superfície livre em função da velocidade do vento (Azenha, M.Â.D., 2004). Os valores para a velocidade do vento podem ser consultados também em (Azenha, M.Â.D., 2004).

$$h_{free} = \begin{cases} 5.6 + 3.95v & v \leq 5m/s \\ 7.6v^{0.75} & v > 5m/s \end{cases} \quad (2.13)$$

2.1.5. RADIAÇÃO

Radiação térmica é o processo de emissão, por um corpo, de energia radiante. Admite-se que todo o corpo que não seja totalmente transparente, emite e absorve de forma permanente radiações térmicas. Então, sempre que uma radiação incide um corpo, alguma dessa energia penetra através da superfície sendo a restante refletida. Dentro da energia que penetra, parte dessa energia é absorvida, sendo responsável pela elevação da temperatura do corpo (caso seja maior que a energia dissipada), e outra parte é transmitida através do corpo.

A relação entre as energias absorvidas, refletida e transmitida pela energia total é dado pelos coeficientes de absorção (α), reflexão (ρ) e transmissão (τ) pelo que a soma dos três coeficientes é igual à unidade.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.14)$$

α – coeficiente de absorção,

ρ – coeficiente de reflexão,

τ – coeficiente de transmissão.

Um caso particular desta equação ocorre quando o corpo tem capacidade de absorver toda a radiação que nele incide ($\alpha=1$). Neste caso poderemos dizer que o corpo é designado por corpo negro. No entanto, tal situação não passa de uma idealização visto que na natureza não existe um corpo com tais características.

No que respeita a capacidade de emissão de radiação, é usado parâmetro ϵ para caracterizar o poder de emissividade. Para betões poderá ser usado um valor de $\epsilon=0,88$ (Azenha, M.Â.D., 2004).

As leis de transmissão de calor por radiação poderão ser consultadas em (Silveira, A.F.d., 1961, Silveira, A.P.C.d., 1996, Teles, M.M.M.S., 1986).

2.1.5.1. ABORDAGEM DA LEI DE NEWTON NO PROCESSO DA RADIAÇÃO

A expressão para a radiação emitida por um corpo é dada pela lei de Stefan-Boltzmann que estabelece que o fluxo de energia é proporcional á quarta potência da temperatura absoluta. Para melhor compreensão deste fenómeno, recomenda-se o estudo dos autores referenciados no subcapítulo anterior.

No entanto, esta abordagem não é prática de se manipular pelo que para estruturas de betão se recorre a lei de Newton, definida para a convecção, para o cálculo do fluxo de calor por radiação.

O campo de aplicabilidade desta lei para a radiação é válido mas num campo mais restrito. Para variações de temperatura entre o betão e o ambiente, supondo que a temperatura ambiente é da ordem dos 20°C, pode-se concluir que não há grandes variações entre a equação simplificada da lei de Newton e a equação teórica de Stefan-Boltzmann (Azenha, M.Â.D., 2009). No presente caso

de estudo, como os processos de convecção e de condução prevalecem sobre o da radiação (entre corpos), pode-se usar um valor do coeficiente que resulta na soma dos efeitos da radiação com a convecção (Silveira, A.F.d., 1961, Silveira, A.P.C.d., 1996). Logo:

$$h_{c,r} = h_c + h_r \quad (2.15)$$

em que:

h_c – coeficiente de convecção

h_r – coeficiente de radiação

$h_{c,r}$ – coeficiente total

A lei de Newton pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q = h_{c,r} \times A \times (T_s - T_f) \quad (2.16)$$

Para o cálculo de h_r , irá ser utilizada a fórmula referida em (Azenha, M.Â.D., 2009) que é dada por:

$$h_r = \varepsilon (4.8 + 0.075 (T_{amb} - 278.15)) \quad (2.17)$$

em que h_r é o coeficiente de radiação, a emissividade é 0.88 e a temperatura ambiente é dada em graus Kelvin.

2.1.5.2. RADIAÇÃO SOLAR

No estudo do problema térmico, é necessário ter em conta o efeito da radiação solar visto que, como o caso de estudo se trata de uma barragem (estruturas de betão em massa), pode representar um grande impacto na sua superfície podendo dar origem à fendilhação superficial. Em estruturas como as barragens, como o calor de hidratação pode demorar anos a dissipar, a consideração da radiação solar pode ser relevante devido à sua ação diária repetitiva.

Ao atravessar a atmosfera terrestre a radiação solar sofre perturbações pelo que é usual subdividir a radiação em dois tipos: a direta e a difusa. A radiação solar que atravessa a atmosfera sem ser desviada nem absorvida no seu caminho corresponde à radiação direta. A radiação difusa corresponde à parte da radiação solar que é dispersa durante o seu percurso devido a distúrbios com os componentes atmosféricos.

A radiação que chega ao nível do mar é dada por q_m e pode ser estimada através da fórmula empírica (Azenha, M.Â.D., 2009):

$$q_m = q_0 e^{\frac{-T_l}{0.9+9.4\sin(h)}} \quad (2.18)$$

em que:

q_0 – é uma constante solar que tem um valor médio de 1367 Wm^{-2} (Azenha, M.Â.D., 2009),

T_l – fator de turvação,

h – altura de elevação do sol.

O fator de turvação pode variar entre 1,8 e 3 para um céu limpo e entre 8 e 9 para zonas nubladas ou poluídas (Silveira, A.P.C.d., 1996).

A análise do fluxo de radiação direta solar numa superfície inclinada envolve a consideração de certos parâmetros geométricos que estão representados na figura 2.5:

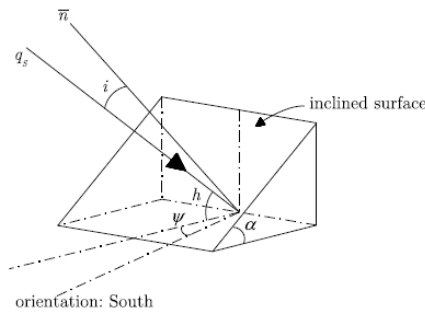


Fig. 2.4 - Incidência dos raios solares numa superfície inclinada (Azenha, M.Â.D., 2009).

em que:

α é o ângulo que a superfície faz relativamente à horizontal;

\bar{n} é o versor normal á superfície;

Ψ é o azimuth que resulta da projeção do versor no plano horizontal;

h é a altura solar e corresponde ao ângulo entre a direção do sol e o horizonte;

i é o ângulo de incidência dos raios solares relativos ao versor \bar{n} .

O cálculo da radiação solar incidente numa superfície num dado instante envolve o conhecimento de vários parâmetros (Azenha, M.Â.D., 2009) tais como:

- O ângulo entre os raios solares e o plano da órbita da Terra à volta do sol. Esse ângulo é dado pelo símbolo δ e pode ser calculado como:

$$\sin(\delta) = 0.39782 \sin\left(4.871 + \frac{\pi}{180} d + 0.033 \sin\left(\frac{\pi}{180} d\right)\right) \quad (2.19)$$

em que d é o dia do ano;

- O ângulo que descreve a atual posição do Terra relativa ao sol que é dado pelo símbolo Ω . A sua definição é dada por:

$$\Omega = 15t \quad (2.20)$$

em que t é dado em horas. O ângulo Ω varia entre -180° ($t=-12h$) e 180° ($t=12h$) o que implica uma rotação de 360° ao longo de 24h;

- A altura solar h que é dada por:

$$\sin(h) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\Omega) \quad (2.21)$$

em que φ é a latitude e os restantes são parâmetros acima explicados;

- O ângulo de incidência i que é calculado por:

$$\cos(i) = \cos(\alpha)\sin(h) + \sin(\alpha)\cos(h)\cos(\Psi) \quad (2.22)$$

Assim, a radiação que é absorvida por uma superfície de betão depende da radiação solar q_m dada pela expressão (2.18), do ângulo de incidência dado pela expressão (2.22) e por um coeficiente de absorção α_s que está relacionado com a cor da superfície. Este coeficiente tem valores compreendido entre 0.5 e 0.6 (Azenha, M.Â.D., 2004). A expressão fica:

$$q_{s,bet\tilde{a}o} = \alpha_s q_m \cos(i) \quad (2.23)$$

2.1.6. CALOR DE HIDRATAÇÃO

De todos os elementos que constituem o betão, do ponto de vista térmico, o cimento é o mais influente pois é ele o responsável pelo calor que se desenvolve na massa de betão, o designado calor de hidratação.

O calor desenvolvido depende das proporções em que os diferentes componentes de cimento entram na sua composição e de outros fatores tais como finura do cimento, relação água-cimento e temperatura inicial.

O cimento é composto por silicato tricálcico (SC_3), silicato bicálcico (SC_2), aluminato tricálcico (AC_3) e aluminato-ferrito tetracálcico (C_4AF) sendo que os dois primeiros desempenham um maior papel na resistência mecânica do cimento.

No que respeita à libertação de calor, o aluminato tricálcico é o componente mais indesejável pois produz grandes quantidades de calor e com uma taxa de produção alta enquanto que o aluminato-ferrito tetracálcico e o silicato bicálcico produzem pouco calor e de forma lenta. O silicato tricálcico apresenta características medianas entre o aluminato tricálcico e outros dois componentes.

Como o desenvolvimento de calor é indesejável, pode fazer-se a correção do cimento, alterando a sua composição, como por exemplo , a substituição do aluminato tricálcico pelo aluminato-feerrito e a de parte do silicato tricálcico por silicato bicálcico(Silveira, A.F.d., 1961).

2.1.6.1. DETERMINAÇÃO DA GERAÇÃO POTENCIAL DE CALOR

O conhecimento da geração potencial de calor de um cimento é essencial para caracterizar o comportamento térmico e prever o risco de fendilhação prematura.

Existem métodos experimentais para a determinação da taxa de geração de calor. São esses a calorimetria adiabática, a calorimetria semi-adiabática, a calorimetria isotérmica(Azenha, M.Â.D., 2009).

Dentro destes ensaios, destaque para o ensaio da calorimetria adiabática (a ser usado no caso de estudo) que como o nome indica, é simulado em condições adiabáticas para garantir que não há trocas de calor com o exterior. Os ensaios podem ser efetuados sobre amostras de betão ou sobre pastas de cimento com massa da ordem dos 10Kg. Este ensaio tem como pressuposto que a condutibilidade térmica é constante durante a hidratação. A expressão usada para determinar a quantidade de calor gerada num ensaio adiabático é a seguinte:

$$\dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.24)$$

Este ensaio tem como principal desvantagem a realização de um outro ensaio para determinar o calor específico ou proceder a uma estimativa o que pode introduzir erros.

A grandeza da geração potencial de calor pode ser determinada recorrendo à lei de Arrhenius. Para tal, recomenda-se o estudo de (Azenha, M.Â.D., 2009).

2.1.6.2 ADIÇÕES PARA REDUÇÃO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO

Como foi referido, o componente do cimento que gera maior calor de hidratação é o C_3A seguindo o C_3S . Assim, como objetivo de minimizar a ocorrência de fendilhação nas primeiras idades, é desejável diminuir a sua quantidade.

Esta minimização é possível com recurso a adições sendo que as mais usadas são as escórias de alto forno e as cinzas volantes.

No entanto, deve ser tido em conta que as propriedades mecânicas se desenvolvem de forma mais lenta pelo que a quantidade de adições a usar deve ser previamente estudada.

No âmbito deste trabalho, ir-se-á apenas definir as cinzas volantes, pois são as adições que serão usadas no caso de estudo.

As cinzas volantes são subprodutos industriais obtidos por captação das poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadoras com carvão pulverizado. São também utilizadas como substitutos parciais do cimento com efeitos redutores sobre o desenvolvimento do calor de hidratação, dando origem a cimentos de baixo calor de hidratação.

2.1.7. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA

Para a resolução dos problemas térmicos, é necessário resolver as equações diferenciais que regem os fenômenos em análise e satisfazer determinadas condições fronteira.

A equação de condução de calor, juntamente com as condições fronteira pode ser abordada recorrendo ao método dos elementos finitos utilizando o método dos resíduos pesados e sendo em geral seguida a formulação de Galerkin, que corresponde à utilização de funções interpoladoras para a função temperatura.

A equação diferencial de calor ao longo de todo o volume Ω_e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \dot{T} \quad (2.25)$$

Aplicando a condição de Newman (Zienkiewicz, O.C. [et al.], 2005) na fronteira Γ_q , o fluxo de calor é expresso por:

$$q_h = h_{c,r} \times A \times (T - T_{amb}) \quad (2.26)$$

Seguindo a aplicação corrente pelo método dos elementos finitos temos que para a discretização do campo de temperaturas poder-se-á definir a aproximação:

$$T = NT^e \quad (2.27)$$

Em que N é a matriz das funções interpoladoras e T^e representa as temperaturas nodais para um dado elemento finito. Após alguma manipulação matemática, a forma fraca das equações de equilíbrio assume o aspeto:

$$\int_{\Omega_e} N^T \rho c \dot{T} d\Omega + \int_{\Omega_e} \nabla N^T k \nabla T d\Omega = \int_{\Omega_e} N^T \dot{Q} d\Omega - \int_{\Gamma_{qe}} N^T q_h d\Gamma_q \quad (2.28)$$

Fazendo agora uma discretização temporal considerando uma sequência de instantes separados por intervalos de tempo, a derivada \dot{T}_{n+1} pode ser definida como:

$$\dot{T}_{n+1} = (T_{n+1} - T_n) / \Delta t \quad (2.29)$$

Sendo que a equação (2.18) no instante t_{n+1} pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \left[\int_{\Omega_e} N^T \rho c N d\Omega \right] (T_{n+1}^e - T_n^e) + \\ & \left[\int_{\Omega_e} \nabla N^T k \nabla N d\Omega + \int_{\Gamma_{qe}} N^T h N d\Gamma_q \right] T_{n+1}^e = \\ & \int_{\Omega_e} N^T \dot{Q} d\Omega + \int_{\Gamma_q} N^T h T_{amb} d\Gamma_q \end{aligned} \quad (2.30)$$

que pode ser condensado da seguinte forma:

$$\frac{1}{\Delta t} C^e (T_{n+1}^e - T_n^e) + K^e T_{n+1}^e = F_T^e + F_Q^e \quad (2.31)$$

em que

$$C^e = \int_{\Omega_e} N^T \rho c N d\Omega \quad (2.32)$$

$$K^e = \int_{\Omega_e} \nabla N^T k \nabla N d\Omega + \int_{\Gamma_{qe}} N^T h N d\Gamma_q \quad (2.33)$$

$$F_T^e = \int_{\Gamma_{qe}} N^T h T_{ext} d\Gamma_q \quad (2.34)$$

$$F_Q^e = \int_{\Omega_e} N^T Q d\Omega \quad (2.35)$$

Para melhor compreensão deste tema, sugerem-se os estudos de (Azenha, M.Â.D., 2009, Teles, M.M.M.S., 1986, Zienkiewicz, O.C. [et al.], 2005).

2.2. PROBLEMA MECÂNICO

2.2.1. INTRODUÇÃO

Assumindo-se o modelo térmico desacoplado do modelo mecânico, uma vez feita a análise do primeiro, partir dos seus resultados procede-se então para a análise mecânica. Apesar de as análises incidirem sobre a mesma geometria, é necessário ter em conta o tipo de elementos e discretizações que são feitas pois por vezes na análise mecânica o grau das funções interpoladoras é maior. A quantificação da evolução das propriedades do betão é um assunto essencial no que diz respeito à análise mecânica. No presente capítulo são referidas as duas metodologias alternativas, uma baseada no grau de hidratação e outra baseada na maturidade, sendo dada mais relevância a esta última. Também irá ser feita uma referência ao coeficiente de dilatação térmica, uma vez que obtidas as temperaturas as extensões vêm afetadas deste coeficiente, e ao coeficiente de Poisson.

Na análise mecânica, é necessário ter em conta o carácter viscoelástico do betão nas primeiras idades o que torna necessário definir a fluência e uma formulação que possa traduzir o seu desenvolvimento pois, como se sabe, este fenómeno (fluência) desempenha um papel importante

na evolução das tensões. Por fim irá ser abordado o tema da retração em que se apresentam as suas principais componentes e a sua importância para os tipos de betão (normal ou alto desempenho).

2.2.2. GRAU DE HIDRATAÇÃO E MATURIDADE

Os processos de hidratação que ocorrem durante a fase de endurecimento do betão dependem de vários fatores tais como a composição do clínquer, finura do cimento, relação água/cimento, presença de adjuvantes e temperatura ambiente.

Existem dois conceitos associados à quantificação do desenvolvimento das propriedades do betão. São eles o grau de hidratação e a maturidade.

O grau de hidratação α é um parâmetro que está compreendido entre 0 e 1 e é definido pelo quociente entre a quantidade de cimento que já reagiu num dado instante e a quantidade total de cimento no instante inicial.

A maturidade é um conceito em que são tidos em conta de forma simultânea o efeito da temperatura e do tempo.

Seguidamente irá ser apresentado com maior detalhe apenas o conceito de maturidade uma vez que será este o conceito abordado no caso de estudo.

2.2.3. MATURIDADE

Tal como foi acima mencionado, o conceito de maturidade surge como forma de estimar as propriedades do betão conjugando simultaneamente o efeito da temperatura e do tempo.

Este conceito surgiu em 1951 por Saul que o enuncia da seguinte forma: "...betões com a mesma mistura e com o mesmo grau de maturidade têm a mesma resistência, qualquer que tenha sido a combinação de tempo e temperatura para atingir esse grau de maturidade".

A expressão analítica para o conceito de maturidade denominada por Saul-Nurse(Peres, L. [et al.]) é dada por:

$$M(T, t) = \sum_0^t (T_a - T_0) \Delta t \quad (2.36)$$

em que:

$M(T, t)$ – fator de maturidade à idade t (°C.h);

Δt – intervalo de tempo (horas);

T_a – temperatura média do betão no intervalo de tempo considerado;

T_0 – temperatura de referência.

Existem algumas propostas para a temperatura de referência. McIntosh (1949) propôs inicialmente um valor de -1.1°C sendo que mais tarde Carino e Lew (2001) propuseram um valor de -10°C para a temperatura base(Peres, L. [et al.]).

Em 1977, Freiesleben Hansen and Pdersen, definiram uma nova função capaz de representar o desenvolvimento da resistência do betão nas primeiras idades. Esta função é baseada na lei de Arrhenius em que se permitiu criar a função de idade equivalente (t_{eq}). A idade equivalente corresponde ao tempo que um betão tem de ser curado à temperatura de referência para atingir a mesma resistência obtida sob condições reais de cura, isto é, temperaturas variáveis e diferentes de 20°C.

Atualmente, a maturidade é traduzida por uma expressão que representa a cinética da reação a uma dada temperatura:

$$M(t, T) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau \quad (2.37)$$

em que $K(T)$ é a derivada em ordem ao tempo do parâmetro de reação à temperatura T . Esta fórmula pode ser encontra em (Azenha, M.Â.D., 2004) e representa a formulação da Lei de Arrhenius para o caso da hidratação do betão. A expressão é:

$$K(T) = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.38)$$

em que A é uma constante de proporcionalidade (1/s), R a constante universal dos gases perfeitos (que vale 8.314J/mol) e E_a a energia de ativação (em J/mol). Para melhor compreensão deste assunto da energia de ativação e da Lei de Arrhenius, sugere-se a leitura da referência citada neste parágrafo.

Seguindo esta mesma referência, e após alguma manipulação matemáticas tem-se que a idade equivalente é:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T(ref)} \right)} d\tau \quad (2.39)$$

A partir desta equação, deduz-se a expressão preconizada no MC90 para a idade equivalente através da aproximação dos integrais aos somatórios, definindo as temperaturas em graus Celsius e considerando $\frac{E_a}{R}=4000$ K. Sendo assim:

$$t_{eq} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot e^{\left(13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}} \right)} \quad (2.40)$$

Em que n designa o número de incrementos Δt_i em que o intervalo de tempo é dividido, e $T(\Delta t_i)$ representa a temperatura média no intervalo Δt_i .

É de notar que o rácio entre a energia de ativação e a constante de gases ideais (constante de Arrhenius) está tomado para um valor de 4000 K para cimentos Portland(Azenha, M.Â.D., 2004). No entanto, neste caso de estudo, o cimento tem cinzas volantes o que irá alterar o valor deste rácio.

2.2.3.1. PROPRIEDADES EVOLUTIVAS DO BETÃO

Tendo agora definido o conceito de idade equivalente, através desta idade equivalente é possível estabelecer funções capazes de definir analiticamente a evolução das propriedades mecânicas do betão. Para tal, define-se uma função X_i que relaciona a idade equivalente com a resistência à tração e a resistência à compressão. O módulo de elasticidade é obtido de acordo com a resistência à compressão adquirida numa dada idade comparativamente como a que irá obter aos 28 dias.

A função X_i é dada no EC2(CEN, 2004) como:

$$X_i(t_{eq}) = X_{28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \right]^n \quad (2.41)$$

em que:

s-coeficiente que depende do tipo de cimento variando entre 0.2 e 0.38;

n- parâmetro que para a resistência a compressão tem o valor de 1 e para a resistência a tração vale 1 para um tempo inferior 28 dias e 2/3 para tempo maior ou igual 28dias.

Contudo, uma nova formulação da função X_i foi adotada de forma a ter em conta que as tensões e as propriedades mecânicas apenas se desenvolvem a partir de uma idade t_0 (Azenha, M.Â.D., 2009). Por definição, t_0 é o instante entre o qual a água entre em contacto com o cimento e o tempo em que o betão se desenvolveu o suficiente estruturalmente para permitir a transferência de tensões.

Assim sendo, a nova expressão X_i é dada por:

$$X_i(t_{eq}) = X_{28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}-t_0}} \right)} \right]^n \quad (2.42)$$

Com a função X_i definida as expressões da resistência a compressão, tração e módulo de elasticidade são respetivamente:

$$f_c(t_{eq}) = f_{c28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}-t_0}} \right)} \right]^1 \quad (2.43)$$

$$f_{ct}(t_{eq}) = f_{ct28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}-t_0}} \right)} \right]^{2/3} \quad (2.44)$$

$$E_c(t_{eq}) = E_{c28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - t_0}} \right)} \right]^{0.3} \quad (2.45)$$

É possível verificar que o módulo de elasticidade desenvolve mais rapidamente que a resistência à tração, que por sua vez esta se desenvolve mais rapidamente que a resistência à compressão com pode ser verificado na figura abaixo no domínio da idade equivalente.

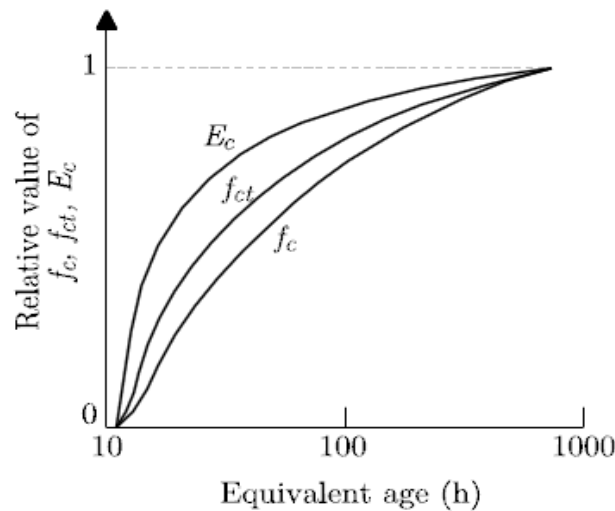


Fig.2.5 - Evolução das propriedades mecânicas do betão de acordo com a idade equivalente(Azenha, M.Â.D., 2009).

2.2.4. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA E COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente de dilatação térmica é um parâmetro que deve ser avaliado e ponderado pois revela uma grande importância na estimação das tensões nas primeiras idades do betão.

De acordo com (Azenha, M.Â.D., 2004) o coeficiente de dilatação térmica é mais elevado no início da hidratação (cerca de $20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$) pelo que vai caindo para valores da ordem dos 10×10^{-6} . Esta queda é justificada pelo facto de o betão se encontrar num estado inicial em que o comportamento é dominado pela água.

Um dos assuntos, dentro do coeficiente de dilatação, que gera controvérsia, no âmbito da sua determinação experimental, é o facto da dificuldade de estabelecer a separação clara entre a deformação térmica e a deformação por retração autogénea. Outra dificuldade na medição deste parâmetro diz respeito às deformações térmicas iniciais que se devem a duas componentes, uma devido à deformação do esqueleto sólido e a outra devido à água entre os poros. A introdução do coeficiente de dilatação térmica nos modelos de cálculo, na forma de avaliar as extensões e as tensões do betão nas primeiras idades, revela a sua importância. No entanto, o estabelecimento de uma fórmula analítica para avaliar este parâmetro é uma questão complicada uma vez que o coeficiente de dilatação térmica depende de uma multiplicidade de fatores tais como condições de humidade e térmica, microestrutura e rede porosa, tipo de cimento e agregados, entre outros(Azenha, M.Â.D., 2009).

Em (Silveira, A.P.C.d., 1996) são propostos valores entre os 6 a 11 (10^{-6} /K). Também nos artigos científicos (Azenha, M. [et al.], 2012, Faria, R. [et al.], 2006) são propostos coeficientes de dilatação térmica para o betão dentro desta ordem de grandeza bem como no estudo (Leitão, L. [et al.]).

No que respeita ao coeficiente de Poisson, durante o processo de hidratação do cimento, o seu valor não é consensual havendo alguns autores que defendem que o seu valor não é constante (Azenha, M.Â.D., 2004). No entanto, o valor do coeficiente de Poisson normalmente usado para o betão endurecido é de 0.2.

Nesta mesma referência é proposta uma função do coeficiente de Poisson em função do grau de hidratação em que assume um valor inicial de 0.5 e que, à medida que endurece, desce para 0.2.

2.2.5 FLUÊNCIA

Nas primeiras idades, a fluência desempenha um papel importante na evolução das tensões de origem térmica uma vez que as deformações de fluência para o betão conduzem a redução de tensões.

O fenómeno de fluência corresponde a um aumento de deformação sob tensão constante. Contudo, no caso de ensaios de fluência do betão nas primeiras idades, essa situação não é reproduzida uma vez que mesmo para carregamentos de valor constante a evolução das propriedades mecânicas leva a que o nível de tensão em relação à resistência diminua ao longo do processo de hidratação (Azenha, M.Â.D., 2004).

Usualmente, a fluência é dividida em fluência básica, em que as condições ocorrem sob condições de equilíbrio de humidade não havendo trocas com o meio ambiente, e em fluência de secagem, que está relacionada com a fluência adicional em relação à básica e que se verifica em peças de betão segundo as quais é permitida a secagem. Este efeito de fluência de secagem é também conhecido com efeito de “Pickett”.

2.2.5.1. FUNÇÃO FLUÊNCIA

A função fluência é dada por $J(t, t')$ e representa o coeficiente de fluência para o instante t , correspondente a um carregamento à idade t' . Esta função, permite também relacionar a tensão com a extensão para cada instante sendo a expressão dada por:

$$\varepsilon_{tot}(t, t') = J(t, t') \sigma(t') \quad (2.46)$$

2.2.5.2. FORMULAÇÃO DA FLUÊNCIA

Dentro das várias formulações que foram propostas para cálculo da fluência, no seguimento deste trabalho, irá ser utilizada a lei da dupla potência, também conhecida como lei de Bazant-Panula, sendo o seu campo de aplicabilidade bastante alargado.

A lei da dupla potência pode ser traduzida por:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \frac{\phi_t}{E_0(t')} (t')^{-m} (t - t')^n \quad (2.47)$$

Onde $E_0(t')$ é o módulo de elasticidade assintótico (correspondente a tempos de carga curtos) e o ϕ , m e n são parâmetros que dependem da composição do betão, a relação água-cimento e o tipo de cimento utilizado. Estes parâmetros são calibrados com base em testes experimentais.

Outras formulações poderão ser consultadas em (Azenha, M.Â.D., 2004).

2.2.6 RETRAÇÃO

A retração está dividida nas componentes de secagem, autogénea e de carbonatação sendo que a retração por carbonatação não é tão relevante como as primeiras duas.

A retração por secagem assume uma maior relevância para os betões normais do que a retração autogénea, enquanto que para os betões de alto desempenho, a retração autogénea assume uma maior importância.

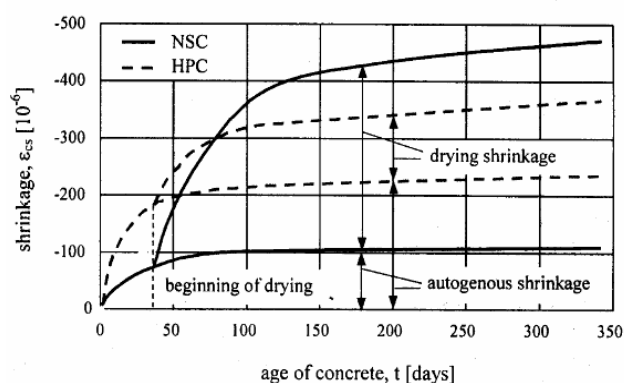


Fig.2.6 - Desenvolvimento da retração autogénea e de secagem para betões normais (NSC) e de alto desempenho (HPC) (Azenha, M.Â.D., 2004).

2.2.6.1. RETRAÇÃO DE SECAGEM

A retração de secagem está ligada à redução de volume do betão como resultado de perda de água para o meio ambiente. Essa perda de água é feita inicialmente por evaporação. Após a eliminação de toda a água exsudada, se ainda não houver equilíbrio de humidade entre o meio ambiente e o betão inicia-se um processo em que a água migrará do interior para o exterior (Azenha, M.Â.D., 2004). Os mecanismos de secagem dependem da rede capilar existente no interior do betão. Nos betões de alto desempenho, como a densidade da microestrutura é maior, a rede capilar é menor não havendo portanto tanta água para eliminar por secagem. Esta é a razão pela qual a retração por secagem assume uma maior importância em betões normais.

2.2.6.2. RETRAÇÃO AUTOGÉNEA

A retração autogénea, como já foi referido, só tem grande influência nos betões de alto desempenho.

Este tipo de retração é definido como a variação macroscópica do volume e ocorre sem trocas de humidade com o exterior, a temperatura constante e aumenta com a diminuição da relação água-

cimento. À medida que as reações químicas ocorrem, a água presente no interior dos poros é consumida o que origina perdas de pressão que provoca assim uma diminuição do volume de betão.

3

METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS EM ESTRUTURAS DE BETÃO EM MASSA

3.1. INTRODUÇÃO

Existem vários tipos de barragens dentro das quais se destacam as barragens de betão, alvenaria, enrocamento e as barragens de aterro. Nas barragens de betão tem-se as do tipo gravidade, de contrafortes, as barragens em arco e arco gravidade. No âmbito desta dissertação, apenas irá ser feito referência às barragens de gravidade em betão.

3.2. BETÃO EM MASSA

O betão em massa é utilizado em estruturas não armadas, em que são utilizados grandes volumes de betão e que estão predominantemente sujeitas a esforços de compressão. As construções deste tipo de estruturas estão sujeitas a riscos de fissuração nas primeiras idades devido à geração de calor e à restrição de deformações volumétricas.

Estas deformações volumétricas podem ser restringidas internamente e externamente (Lameiras, R. [et al.], 2012). As restrições de origem interna ocorrem quando há perda de calor para o ambiente pela sua superfície gerando então gradientes térmicos. Devido à baixa condutibilidade térmica do betão, o equilíbrio térmico não se obtém de forma rápida o que poderão surgir fissuras na superfície, que arrefece mais rapidamente, caso a tensão de tração seja superior à respetiva resistência. Já a restrição externa ocorre por elementos que compõem o contorno do elemento betonado, seja um maciço rochoso ou fases anteriores ou posteriores de betonagem.

Visto estes efeitos se poderem revelar um inconveniente, é prática comum dos projetistas adotar metodologias construtivas de forma a controlar a geração de calor interno e por sua vez o risco de fendilhação.

3.3. METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS

Como já foi referido, de forma a controlar o risco de fendilhação são adotados metodologias construtivas. As metodologias usadas são as seguintes:

- Uso de cimentos especiais
- Dimensão do agregado
- Cofragem
- Pré e pós arrefecimento do betão
- Ritmo de betonagem
- Espaçamento de juntas

3.3.1. USO DE CIMENTOS ESPECIAIS

Como já foi referido no capítulo anterior, a escolha de cimentos com adições atrasam as reações e diminuem a intensidade das reações de hidratação reduzindo os seus efeitos térmicos. Para melhor compreensão deste efeito recomenda-se a leitura de (Silveira, A.F.d., 1961).

3.3.2. DIMENSÃO DO AGREGADO

Um dos fatores essenciais na determinação da quantidade de cimento passa pela seleção do tipo de agregados a utilizar.

A dimensão do agregado permite a alteração da relação w/c uma vez que agregados maiores e em maior quantidade permitem uma menor quantidade de cimento o que diminui as reações de hidratação.

3.3.3. COFRAGEM

Os materiais habitualmente usados na cofragem são o aço e a madeira. Estes dois materiais possuem propriedades térmicas bastantes distintas na medida em que a condutibilidade térmica do aço é muito maior que a da madeira. O efeito isolante das cofragens de madeira pode-se tornar um inconveniente na medida que é dificultada a dissipação do calor do cimento. Com isto, a temperatura do betão à superfície sobe mais do que caso fosse usada uma cofragem metálica. Posto isto, é recomendado descofrar o mais cedo possível de forma a evitar temperaturas máximas(Silveira, A.F.d., 1961).

Consultando esta mesma referência, são impostos valores para espessuras usadas em cofragens.

3.3.4. PRÉ E PÓS ARREFECIMENTO DO BETÃO

Outras formas de redução do calor de hidratação é o processo de pré-arrefecimento e pós arrefecimento. Enquanto que o pré-arrefecimento atua na medida de redução da temperatura máxima atingida pelo betão, o pós-arrefecimento (após a colocação do betão) atua principalmente na medida de redução do período de arrefecimento do betão.

No pré arrefecimento, é possível atingir temperaturas de colocação do betão mais baixas substituindo a água de amassadura por gelo moído. Com este processo, são diminuídos os gradientes de temperatura e é atingido mais rápido o equilíbrio térmico.

A primeira utilização do pós-arrefecimento foi na barragem de Hoover nos E.U.A. O sistema usado foi o da circulação de água fria em serpentinas horizontais embebidas no betão. Estes tubos devem ser feitos de um material metálico, de paredes finas com o intuito de facilitar as trocas de calor (Silveira, A.F.d., 1961).

3.3.5. RITMOS DE BETONAGEM

Dada a impossibilidade da operação de betonagem de estruturas em massa de betão convencional serem contínuas estabelecem-se dois parâmetros relacionados com o ritmo de betonagem. São eles a altura das camadas de betonagem e o intervalo de espera. A consolidação destes dois parâmetros está dependente de características térmicas, das dimensões da barragem, do betão e do teor de cimento.

O cálculo da elevação da temperatura do betão, pode ser feito recorrendo ao método de Schmidt usando o método das diferenças finitas. Para melhor compreensão deste método recomenda-se o estudo de (Silveira, A.F.d., 1958). No que respeita à perda de calor, se a barragem tiver grandes espessuras, a sua perda é feita de forma unidirecional. Numa barragem de pequena espessura, já não será razoável considerar apenas perda de forma unidirecional mas sim de forma bidirecional ou tridirecional.

Segundo (Silveira, A.F.d., 1961) a experiência na Europa e E.U.A. aponta para um ritmo de betonagem envolvendo camadas de 1.50 metros e um tempo de espera de cinco dias. Com este tempo de espera, permite-se então que seja atingida a temperatura máxima sem que outra camada lhe seja sobreposta. A sua diminuição (tempo de espera) poderá acarretar como consequência que a temperatura máxima da camada anterior não tenha sido atingida aquando da colocação de uma nova camada, o que poderá levar a um aumento de temperatura final e portanto um maior tempo de arrefecimento e maiores tensões de origem térmica. Esta diminuição do tempo de espera pode ser exequível uma vez que, como já foi referido, é um fator que está dependente das características do betão. Por outro lado, o aumento exagerado do tempo de espera pode levar a instalação de gradientes térmicos intensos, uma vez que há uma diferença elevada entre a temperatura da camada superior para com a camada inferior, podendo então ocorrer fendilhação. Outro inconveniente para um tempo de espera elevado traduz-se nos prazos de execução e rendimento de obra.

O tipo de cimento usado, com já foi dito, é também um fator preponderante na escolha do ritmo de betonagem. Assim, pode-se optar por escolher um cimento composto, de baixo calor de hidratação. A escolha deste tipo de cimento só se torna vantajosa quando o calor desenvolvido em idades avançadas seja menor do que um cimento mais rápido. Nestes cimentos, o calor fica aprisionado visto que continua a desenvolver-se quando já há camadas por cima.

3.3.6. ESPAÇAMENTO DAS JUNTAS

O plano de juntas deve ser, em princípio, normal à direção das maiores tensões de tração devidas a variações de temperatura. A experiência determinou que deverão existir juntas longitudinais e transversais formadas por um conjunto de blocos de 15x15 metros em barragens cujas temperaturas não são controladas. No entanto, havendo um controlo de temperaturas, é possível espaçar as juntas a uma distância muito maior do que 15 metros (cerca do triplo desta) (Silveira, A.F.d., 1961).

3.4. BARRAGENS DE GRAVIDADE

As barragens de gravidade são estruturas de betão que devido à sua forma geométrica, à sua massa e à resistência mantêm a sua estabilidade quando sujeitas a cargas de projeto (U.S.A.C.E, 1995).

Geralmente, as barragens de gravidade são constituídas por um perfil triangular de forma a se adaptar às condições do local. Este tipo de estruturas pode constituir-se de uma secção galgável (com descarregador) ou não galgável dependendo da função que desempenha no projeto.

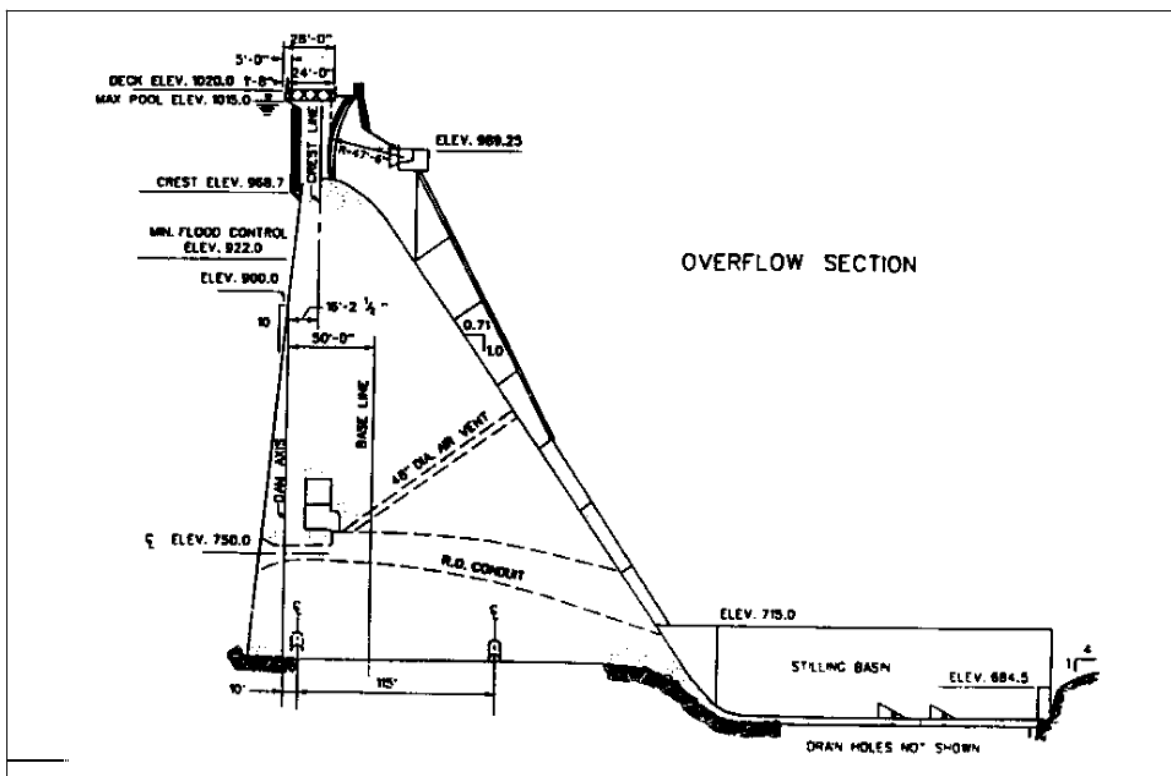


Fig.3.1- Imagem ilustrativa de uma secção de um bloco com descarregador(U.S.A.C.E, 1995).

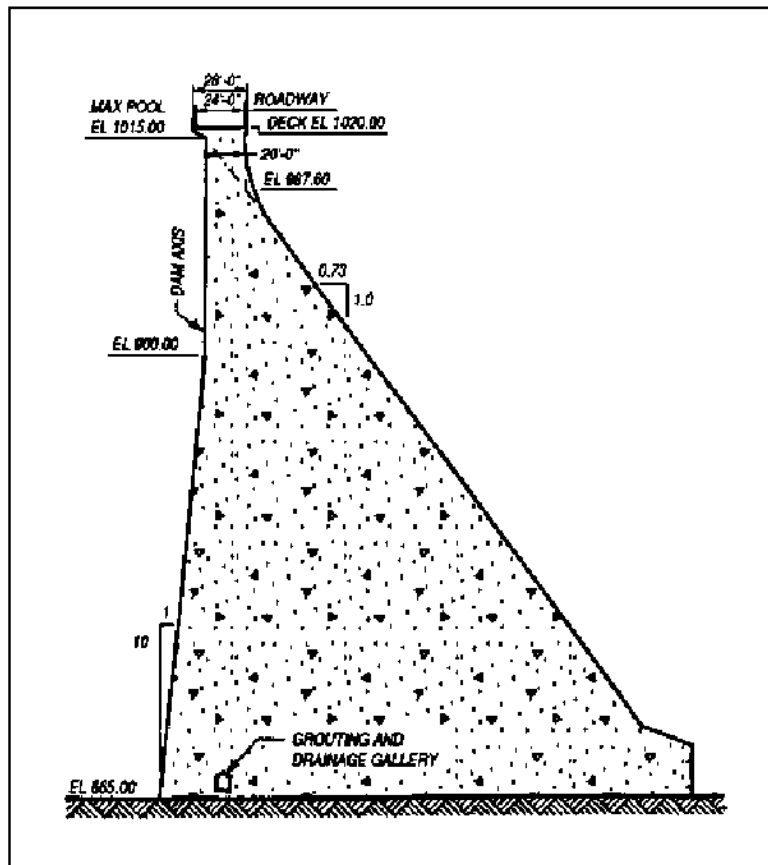


Fig. 3.2- Imagem ilustrativa de uma seção não galgável(U.S.A.C.E, 1995).

3.4.1. SISTEMAS CONSTRUTIVOS ADOTADOS PARA BARRAGENS DE GRAVIDADE

Os dois sistemas atualmente adotados para barragens de gravidade correspondem ao uso de betão em massa convencional e ao betão compactado com cilindros (BCC).

3.4.1.1. BETÃO EM MASSA CONVENCIONAL

As técnicas de construção de barragens de betão têm vindo a ser desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos anos. A taxa de colocação do betão e o seu tamanho são limitados pelo processo de hidratação do cimento do betão convencional pelo que a necessidade de construção em blocos, de forma a atender a fendilhação, é indispensável. O uso de agregados com dimensões em cerca de 75 a 150mm é essencial, aquando da sua mistura com betões com pouco teor em cimento, para manter a sua boa trabalhabilidade. O aumento de temperatura durante o processo de hidratação é menor sendo desenvolvidas propriedades importantes como a resistência à durabilidade e impermeabilidade. A construção de barragens com betão convencional facilita a instalação de condutas, galerias, entre outras dentro da estrutura.

O procedimento construtivo envolve o transporte, colocação, vibração, arrefecimento, cura e a preparação de juntas construtivas entre camadas. A grande quantidade de volume de betão numa barragem de gravidade justifica por vezes a montagem de um estaleiro dedicado e uma adequada fonte com uma qualidade e quantidade de agregados localizados a uma distância económica do projeto. O transporte do estaleiro para a barragem pode ser feito através de baldes com capacidade

de 4 a 12 metros cúbicos. Estes baldes são carregados por camiões, guias, entre outros(U.S.A.C.E, 1995).

3.4.1.2. BETÃO COMPACTADO COM CILINDROS (BCC)

O dimensionamento de barragens de gravidade do tipo BCC é semelhante ao tipo de estruturas com betão convencional. A diferença reside no método de construção.

A vantagem da utilização desta técnica relativamente ao betão convencional reside no elevado ritmo de colocação pelo que se conseguem elevados rendimentos de obra uma vez que se verifica uma rápida evolução da barragem em altura. Contudo, com este ritmo de construção tem-se como desvantagem a não dissipação do calor o que resulta numa temperatura que deve ser controlada(Camelo, A. [et al.]).

O BCC é um betão relativamente seco, sendo que na sua constituição possui agregados finos e grossos que são compactados com cilindros compactadores. Quando este betão se encontra endurecido, apresenta propriedades semelhantes a um betão convencional. Para consolidação efetiva o betão deve ser suficientemente seco para garantir que suporta com o peso dos equipamentos de construção. Contudo, deve ter uma parte mais húmida para garantir uma adequada distribuição de ligante ao longo da massa aquando da mistura e do processo de vibração(U.S.A.C.E, 1995).

3.4.2. ÁREAS ENVOLVIDAS NO PROJETO

Um projeto de barragens envolve uma equipa que abranja diversas áreas. São essas áreas a hidrologia e a hidráulica, geotecnia, geologia e as estruturas. Toda esta equipa deve garantir como objetivo principal numa barragem que as tensões atuantes devem estar dentro de limites pré-estabelecidos e garantir a estabilidade do corpo da barragem. Deve também ser garantir o uso menor possível do volume de betão de forma a garantir um estudo económico.

Para um estudo mais aprofundado sobre os aspetos críticos a ter em conta no dimensionamento de uma barragem, sugere-se a leitura de (U.S.A.C.E, 1995).

3.4.3. AÇÕES ATUANTES NAS BARRAGENS DE GRAVIDADE

As barragens de gravidade estão sujeitas às seguintes ações(Gutstein, D., 2003):

- Peso próprio e sobrecargas fixas;
- Pressão hidrostática;
- Subpressão;
- Pressões intersticiais no betão;
- Pressão de gelo;
- Choques de ondas ou ação dinâmica da água;
- Efeitos da temperatura, retração e deformação do betão;
- Ações devido à deformação das fundações e das encostas;

-Forças sísmicas, em regiões sujeitas a sismos.

Fazendo uma breve referência a estas ações, o peso próprio do betão é normalmente 24kN.m^{-3} ou função do agregado a ser usado.

A pressão hidrostática tem-se como uma variável uma vez que varia conforme os níveis a que o reservatório se encontra quer a jusante quer a montante.

A subpressão é um esforço que atua de forma ascendente, quer na barragem quer na fundação, em função da percolação da água através do maciço(Gutstein, D., 2003). Este maciço pode ser mais ou menos permeável conforme a sua porosidade. Esta porosidade permite a infiltração da água nos poros do maciço exercendo assim pressões intersticiais. Esta subpressão pode atuar na fundação reduzindo assim o peso efetivo do maciço sobrejacente o que pode gerar planos potenciais de deslizamento(Gutstein, D., 2003).

As ações referentes à pressão do gelo, choques de ondas ou ação dinâmica da água e as ações sísmicas são mais importantes nos projetos de barragens sujeitas a esses efeitos. Esse tipo de verificação de estabilidade pode ser feito de acordo com (U.S.A.C.E, 1995).

Por fim as ações devido aos efeitos da temperatura, retração e deformação do betão são avaliadas através de análises térmicas em que as suas metodologias construtivas e o seu método de cálculo já foram descritos anteriormente.

4

ESTUDO PARAMÉTRICO

4.1 OBJETIVO

Neste capítulo irá ser efetuado um estudo paramétrico que tem como objetivo estudar a evolução das temperaturas no betão nas primeiras idades. Este estudo é caracterizado por uma betonagem por fases e será representado por uma “fatia” com um metro de espessura (retirada da barragem) sob o ponto de vista de melhor compreensão da evolução das temperaturas no modelo final da barragem.

Neste estudo paramétrico serão analisados efeitos de vários parâmetros sendo eles a temperatura do local, a temperatura de colocação, altura das camadas de betonagem e a variação do intervalo tempo de espera de betonagem. Pretende-se analisar a influência destes parâmetros na temperatura de pico e na temperatura média do betão, com vista a permitir uma interpretação mais clara dos resultados que serão obtidos no caso de estudo apresentado no capítulo seguinte.

4.2. MODELO BASE

Tal como foi referido, este modelo é representado por uma “fatia” com uma espessura de 1 metro e por cinco camadas de 2 metros de altura cada. Como estudo base, foi assumido uma temperatura exterior de 18°C (temperatura média anual do local) e uma temperatura de colocação de 15°C. Como propriedades do betão usou-se um C15 com uma quantidade de ligante de 180 kg/m³ (25% de cinzas volantes) sendo que a respetiva curva adiabática de temperaturas é calculada a partir de resultados experimentais de calorimetria adiabática da pasta de ligante através pela expressão (2.14) definida no capítulo 2. A sua evolução é dada na figura abaixo:

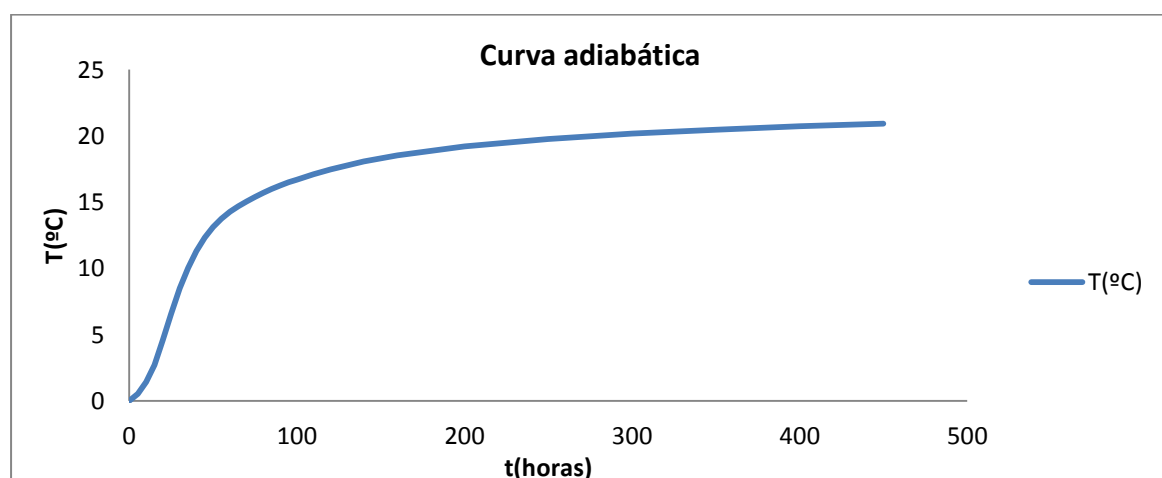


Fig.4.1- Curva adiabática correspondente ao teor de ligante e percentagem de cinzas referido.

O valor do coeficiente de convecção também foi obtido pela expressão 2.15 do capítulo 2 com uma velocidade do vento de aproximadamente 10km/h pelo que o valor final do coeficiente é de $16,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Os valores da condutibilidade térmica e calor específico volumétrico são propostos em (Silveira, A.P.C.d., 1996). Os valores usados neste estudo são $2,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ e $2,16 \times 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{C}^{-1}$ respetivamente.

Na figura abaixo apresenta-se a geometria do modelo base. Apenas se admite fluxo de calor na direção vertical (unidirecional), sendo consideradas adiabáticas as fronteiras verticais e convectivas as fronteiras horizontais. O modelo é considerado representativo na zona interior da barragem durante os primeiros dias subsequentes à betonagem.

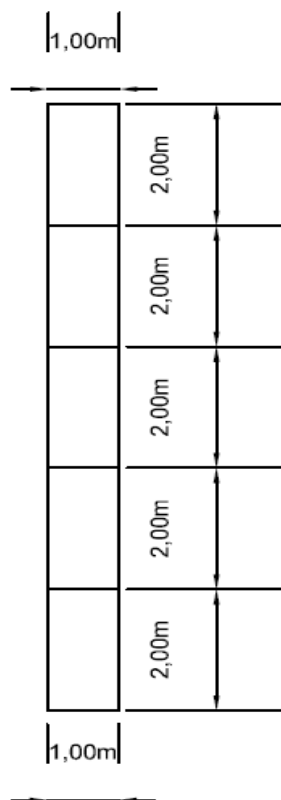


Fig.4.2- Geometria do modelo base.

4.2.1. MALHA

Relativamente à malha, usaram-se elementos de 4 nós nas camadas (elementos quadrangulares) enquanto que nos elementos de fronteira foram usados elementos de 2 nós). Relativamente às divisões, foi feita uma divisão de 0.25m por elemento.

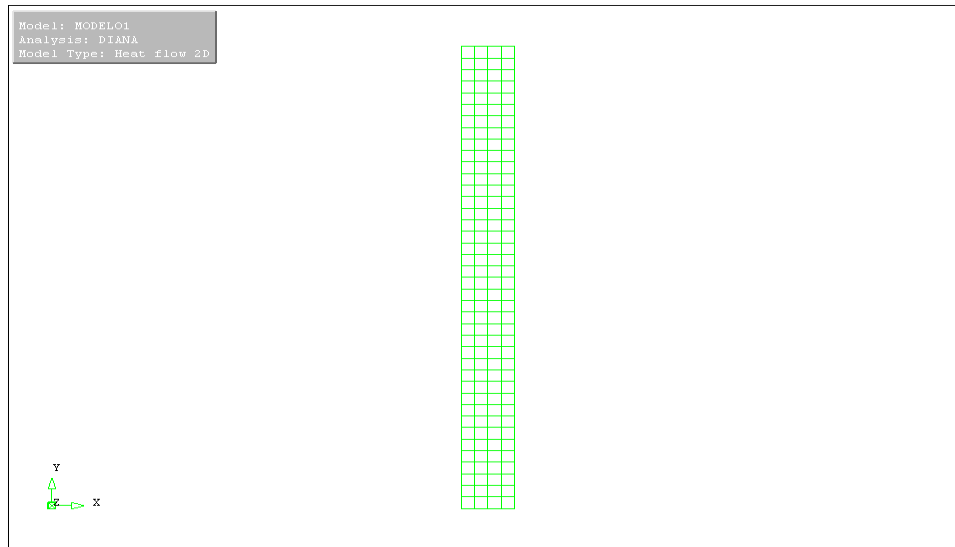


Fig. 4.3- Visualização da malha geral do modelo base (adaptado do DIANA).

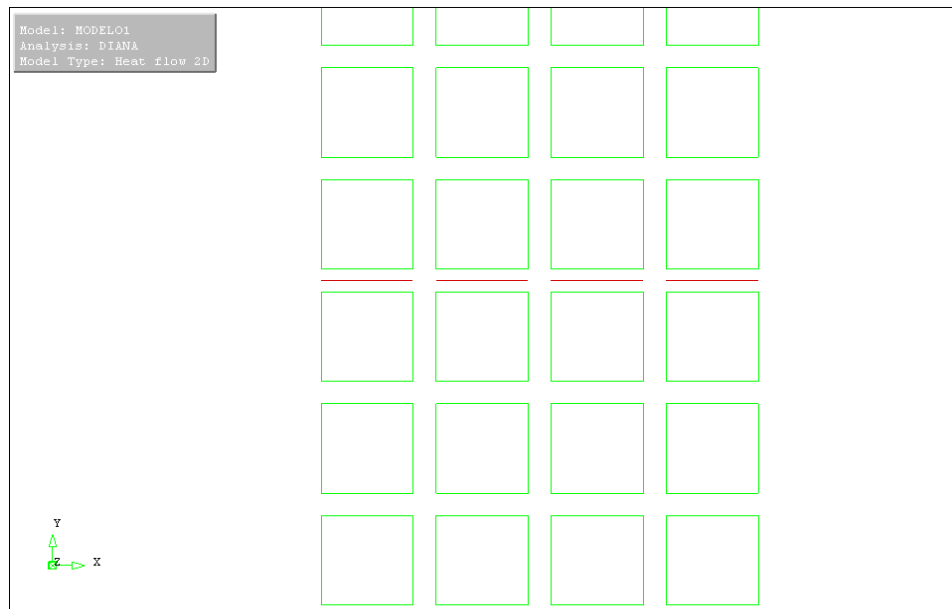


Fig. 4.4- Visualização da zona dos elementos da superfície convectiva a vermelho (adaptado do DIANA).

4.2.2. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Após a inserção da geometria, malha, propriedades dos materiais, temperaturas interiores e exteriores, procedeu-se à análise da temperatura nos nós. Para tal, foi efetuada uma análise na camada central do modelo em que se obteve os gráficos de um nó representativo da zona da base, intermédia e de topo. No quadro seguinte apresentam-se os estudos efetuados:

Quadro 4.1- Estudos efetuados neste modelo.

		Temperatura exterior (°C)	Temperatura de colocação (°C)	Espessura da camada (m)	Tempo de espera (dias)
1	Estudo Base	18.0	15.0	2.0	3
2	Variante_5dias	18.0	15.0	2.0	5
3	Variante_7dias	18.0	15.0	2.0	7
4	Variante_2.5m	18.0	15.0	2.5	3
5	Variante_3.0m	18.0	15.0	3.0	3
6	Variante_2.5m_5dias	18.0	15.0	2.5	5
7	Variante_3.0m_7dias	18.0	15.0	3.0	7
8	Variante_Tint10	18.0	10.0	2.0	3
9	Variante_hcr	18.0	15.0	2.0	3
10	Variante sinusoide_hcr	-	15.0	2.0	3
11	Variante sinusoide_radiação solar céu limpo_hcr	-	15.0	2.0	3
12	Variante sinusoide_radiação solar céu nublado_hcr	-	15.0	2.0	3
13	Cond_Extremas_Inverno_hcr	5.0	10.0	2.0	3
14	Cond_Extremas_Verão_hcr	30.0	15.0	2.0	3

O estudo base será comparado com os estudos 2 ao 9. Nos estudos 2 e 3 serão efetuadas alterações no tempo de espera de betonagem das camadas para 5 e 7 dias respetivamente de forma a averiguar a diferença a nível de evolução de temperaturas. Para o mesmo objetivo servirão os estudos 4 e 5 em que desta vez se efetuam alterações na espessura da camada. Feitos estes estudos, em que se variou o tempo de espera e a espessura da camada, servirão os estudos 6 e 7 para verificar se as alterações de temperatura são muito pronunciadas no caso de se englobar estes dois parâmetros numa só variante. Seguidamente, o estudo 8 tem como objetivo analisar o efeito da temperatura de colocação do betão na evolução das temperaturas comparativamente ao estudo base e no estudo 9 verificar qual o efeito da introdução do coeficiente de radiação na evolução das temperaturas.

Nos estudos 10 a 14, o objetivo passa por estudar o efeito da temperatura exterior em condições extremas. No estudo 10 efetuar-se-á a variação diária das temperaturas através de uma senoide e será comparada com os estudos 13 e 14. De forma a introduzir o efeito da radiação solar efetuar-se-ão os estudos 11 e 12 sendo feita nova comparação com os estudos 13 e 14.

4.2.3 ESTUDO BASE

De acordo com a análise do estudo base obtemos a seguinte evolução de temperaturas:

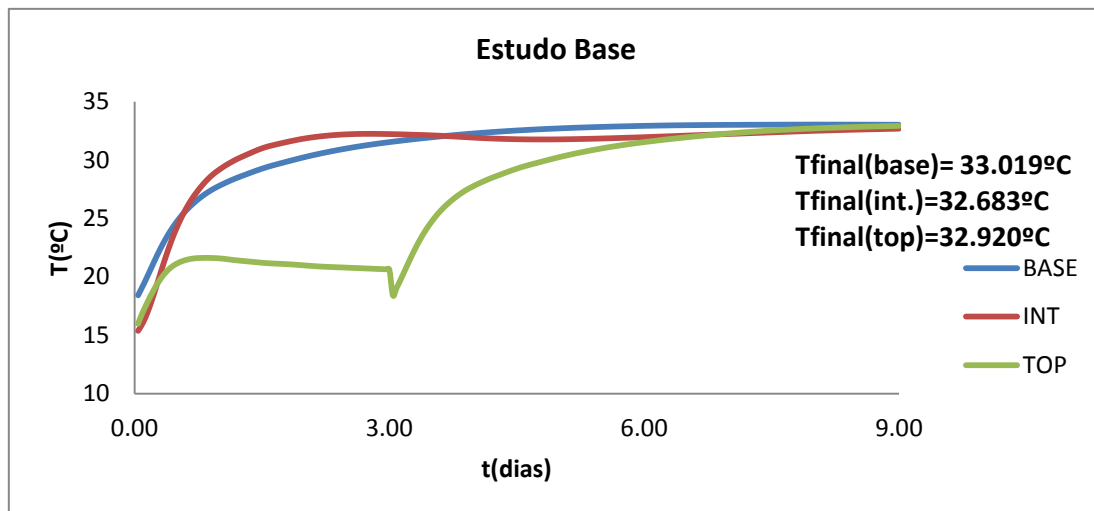


Fig. 4.5- Evolução das temperaturas da camada central na zona da base, na zona intermédia e na zona de topo.

Analisando a evolução pode verificar-se que, inicialmente, a zona base da camada atinge uma temperatura superior visto que por baixo desta camada se encontra já uma outra camada betonada com uma temperatura já superior ao betão fresco (a ser colocado nesta nova camada). Com o passar dos dias a zona intermédia vai atingindo uma temperatura maior, temperatura essa que decresce antes da colocação de outra camada, voltando a aumentar ligeiramente até estabilizar. Quanto à zona de topo, a subida da temperatura é menor visto ser a zona da camada que se encontra à superfície e que está em contacto com a temperatura ambiente. O decréscimo pontual que ocorre por volta dos 3 dias deve-se à colocação da próxima camada a betonar acima desta.

4.2.4. VARIANTE MUDANÇA DA ALTURA DE BETONAGEM DA CAMADA

Efetuando agora a mudança de espessura para 2.5m e para 3.0m é possível observar a seguinte evolução de temperaturas:

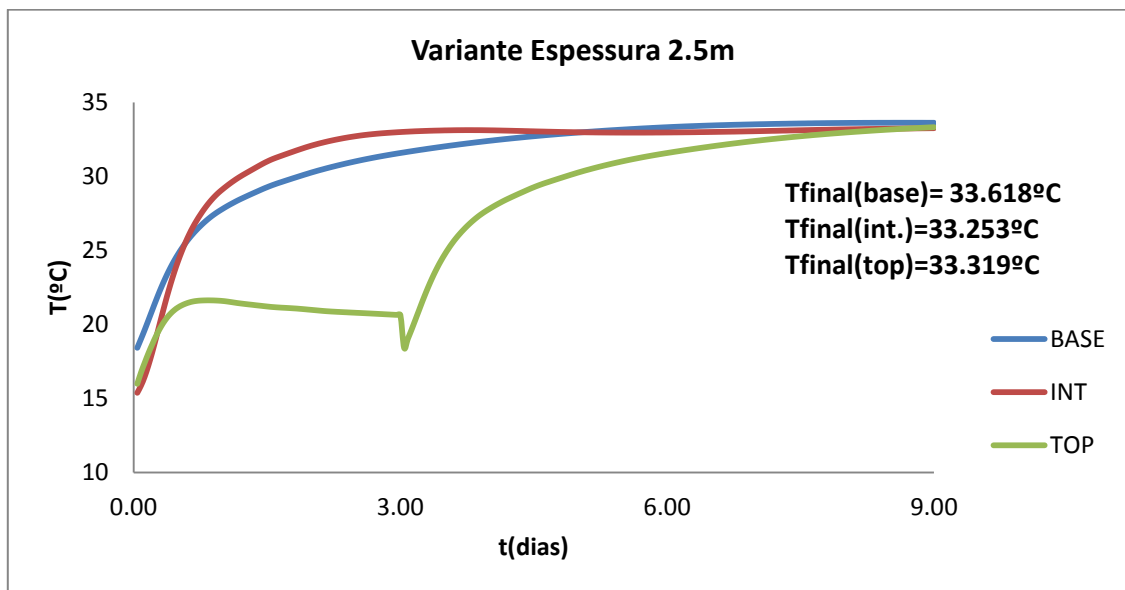


Fig.4.6- Evolução das temperaturas considerando a espessura da camada a 2.5m.

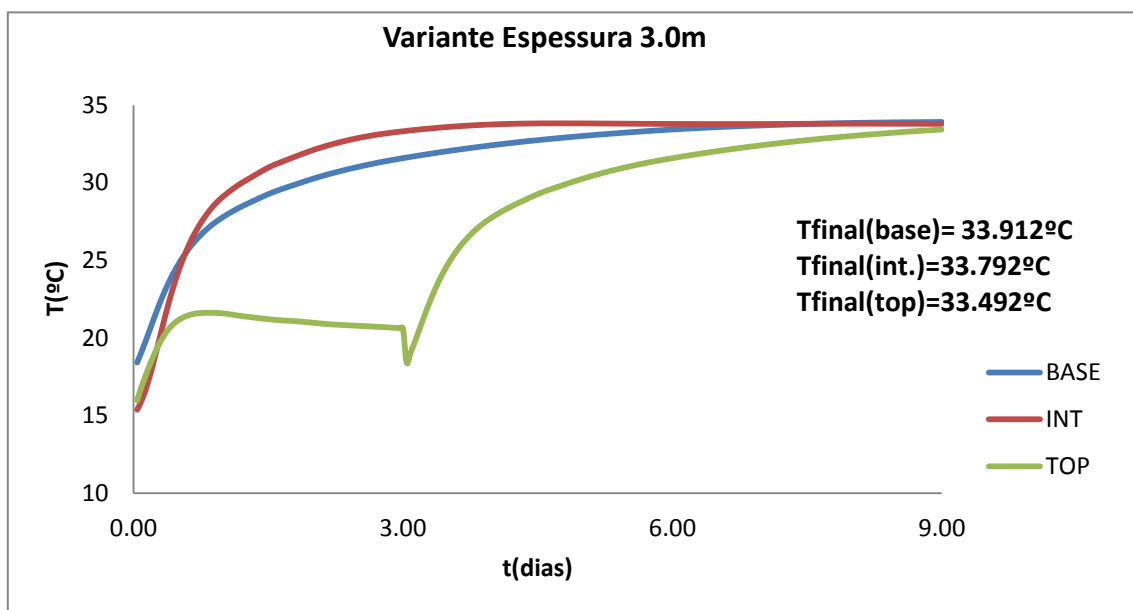


Fig.4.7- Evolução das temperaturas considerando a espessura da camada a 3.0m.

Fazendo agora a comparação das temperaturas entre as duas variantes e o estudo base nas várias zonas da camada, podemos observar a seguinte evolução:

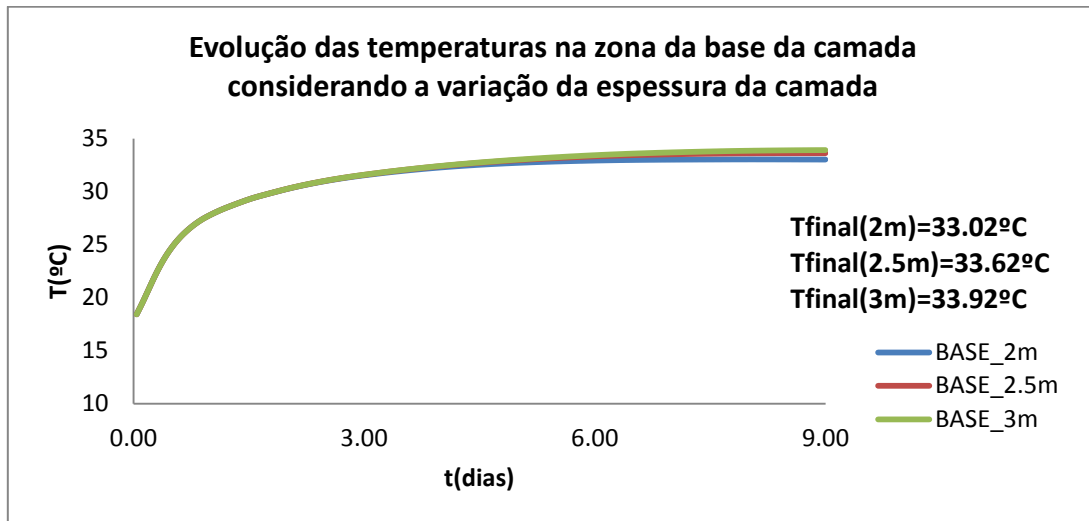


Fig.4.8- Evolução das temperaturas na zona da base da camada variando as espessuras.

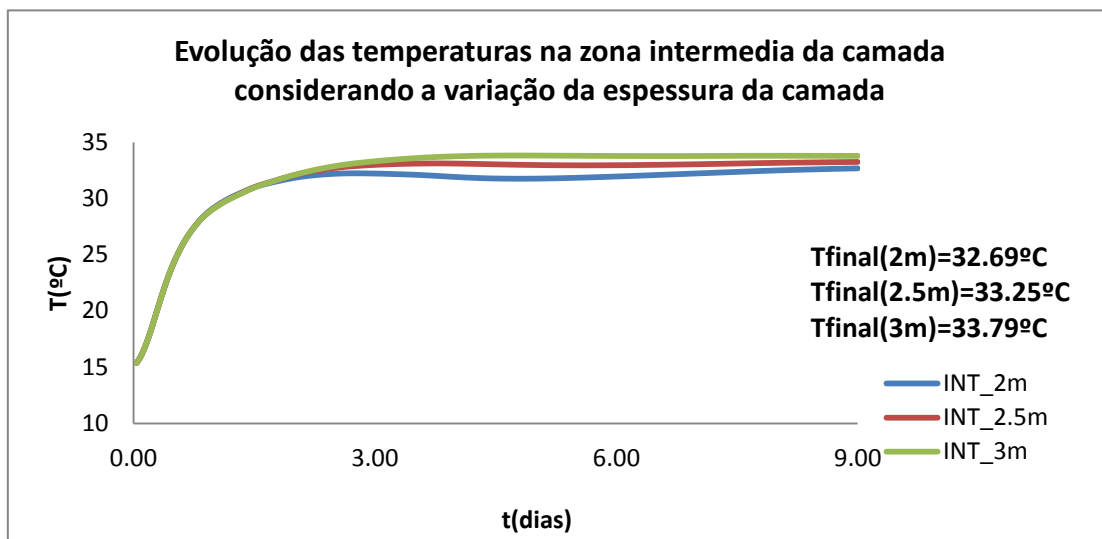


Fig.4.9- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada variando as espessuras.

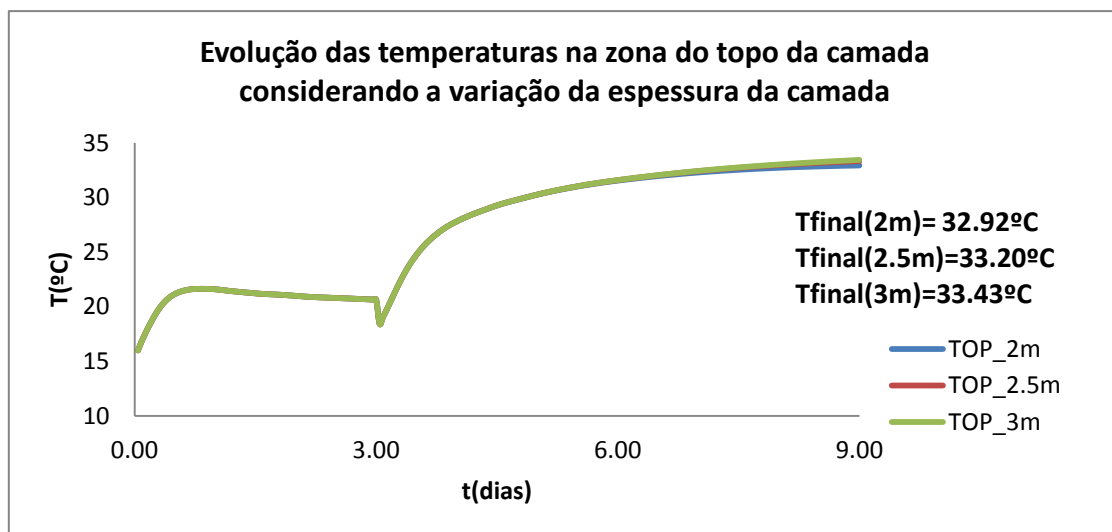


Fig. 4.10- Evolução das temperaturas na zona topo da camada variando as espessuras.

Observando os gráficos acima, em que se comparam as várias espessuras, nota-se que a temperatura final da camada é maior quando se betona espessuras maiores no mesmo tempo de espera. No entanto, devido ao baixo teor de ligante deste betão, pode-se verificar que a diferença de betonar dois metros para três metros apenas varia de aproximadamente 1°C, pelo que se pode concluir que, aumentando a espessura de betonagem de um metro se ganharia em tempos de prazo de execução. No entanto, será necessário avaliar a evolução das tensões aquando do estudo mecânico e verificar se há, ou não, alguma vantagem.

4.2.5. VARIANTE MUDANÇA DO TEMPO DE ESPERA

Apresentando os gráficos de forma análoga aos anteriores temos:

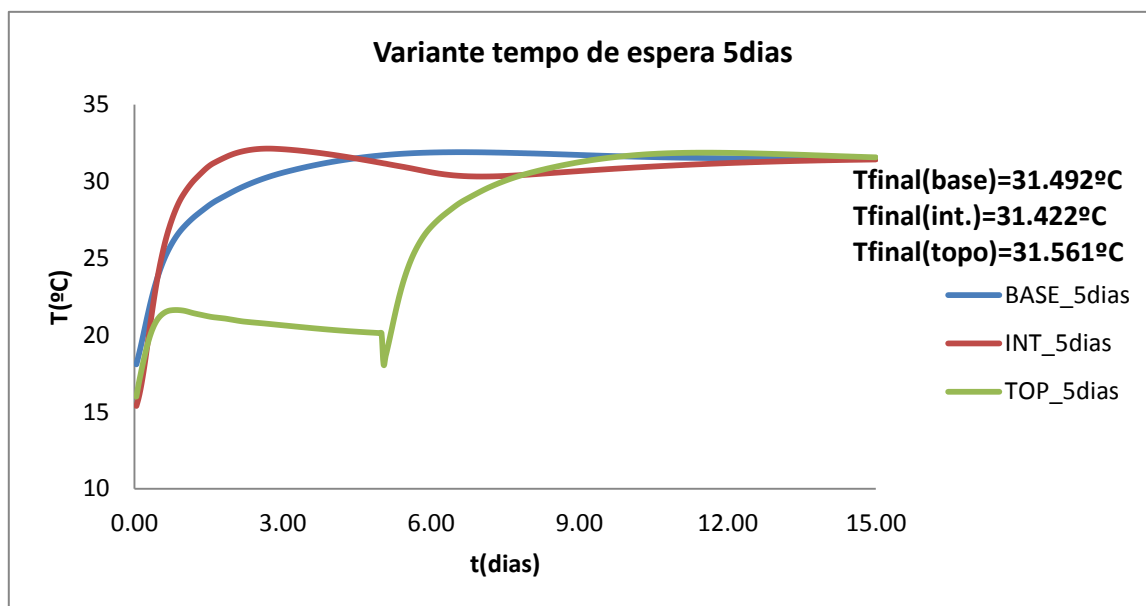


Fig.4.11- Evolução das temperaturas considerando um tempo de espera de 5 dias.

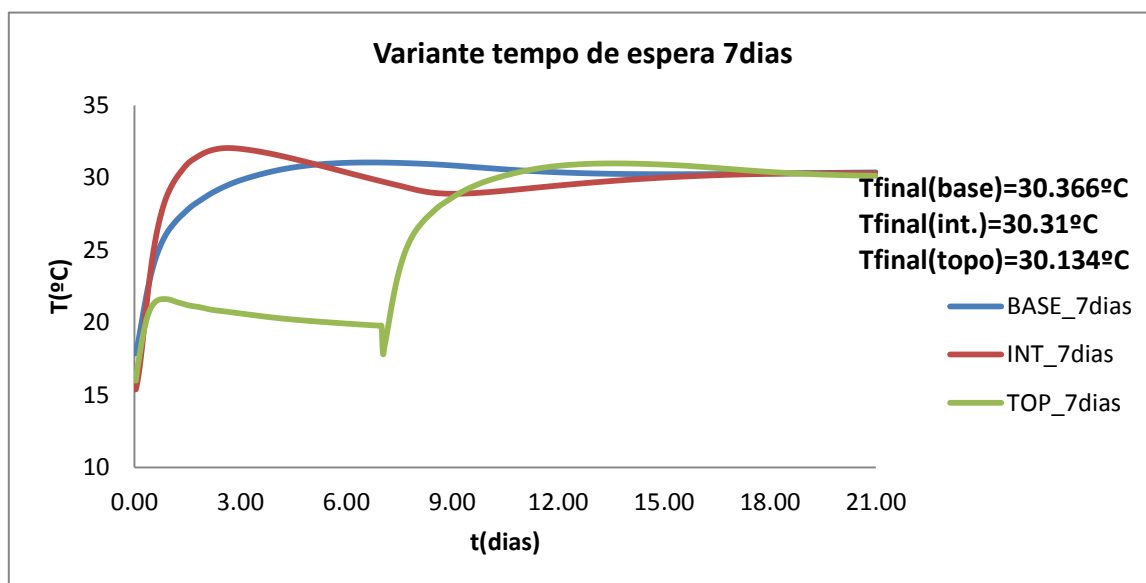


Fig.4.12- Evolução das temperaturas considerando um tempo de espera de 7 dias.

Fazendo agora a comparação entre o estudo base e estas duas variantes anteriormente apresentadas para a zona base, topo e intermédia, tem-se:

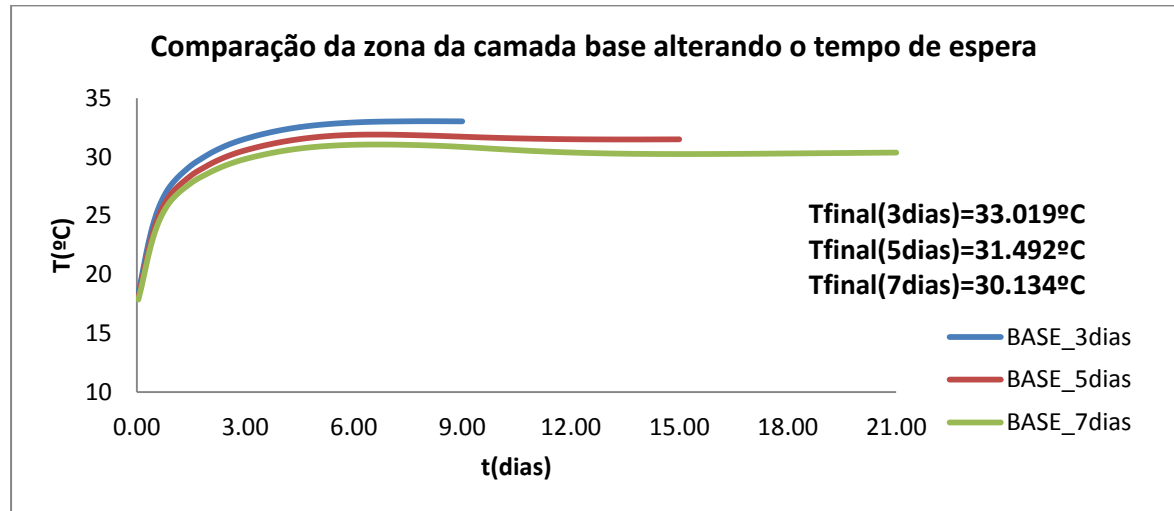


Fig.4.13- Evolução das temperaturas na zona da base da camada variando o tempo de espera.

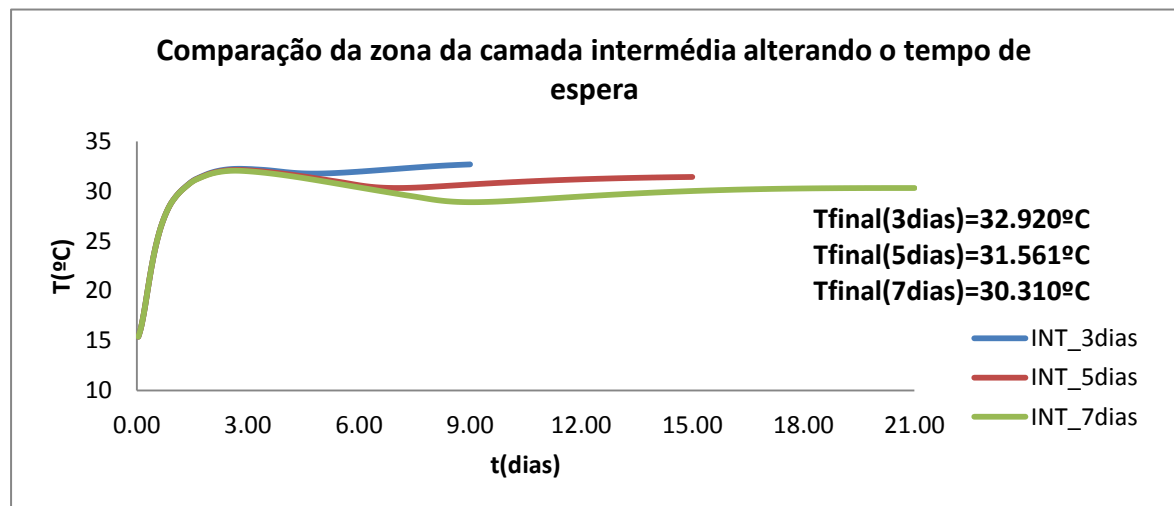


Fig.4.14- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada variando o tempo de espera.

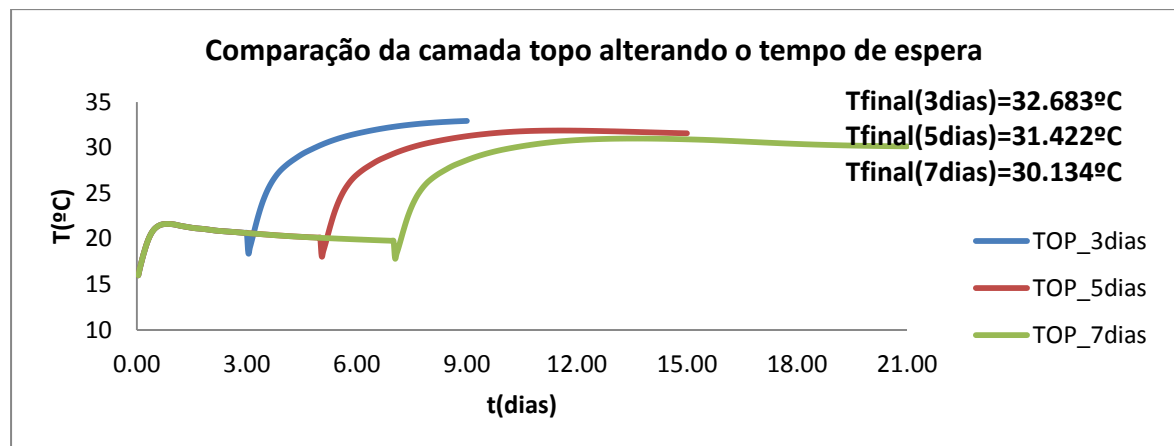


Fig.4.15- Evolução das temperaturas na zona de topo da camada variando o tempo de espera.

Confrontando agora o estudo base com os estudos em que apenas se varia o tempo de espera, é verificada uma descida de 1,5°C (caso de 5 dias de espera) e de aproximadamente de 2,5°C quando comparado com 7 dias de espera. Tal situação seria expectável uma vez que espessura da camada mantém-se constante e o seu tempo de espera aumenta. Tal situação poderá ser vantajosa no que respeita a um arrefecimento de uma temperatura mais baixa para a temperatura ambiente. Contudo, esperar cerca de 5 ou mesmo 7 dias para betonar outra camada pode não ser exequível com os prazos estipulados em obra e poderia alterar de forma negativa os rendimentos em obra.

4.2.6. VARIAÇÃO DA ALTURA DE BETONAGEM DA CAMADA E DO TEMPO DE ESPERA

Após a variação dos dois parâmetros de forma independente (espessura e tempo de espera) seguidamente será feita uma análise em que serão variados os dois parâmetros em simultâneo de forma a garantir rendimentos comparáveis e verificar se se poderá tirar alguma vantagem relativamente aos estudos feitos anteriormente.

As evoluções da temperatura são seguidamente apresentadas:

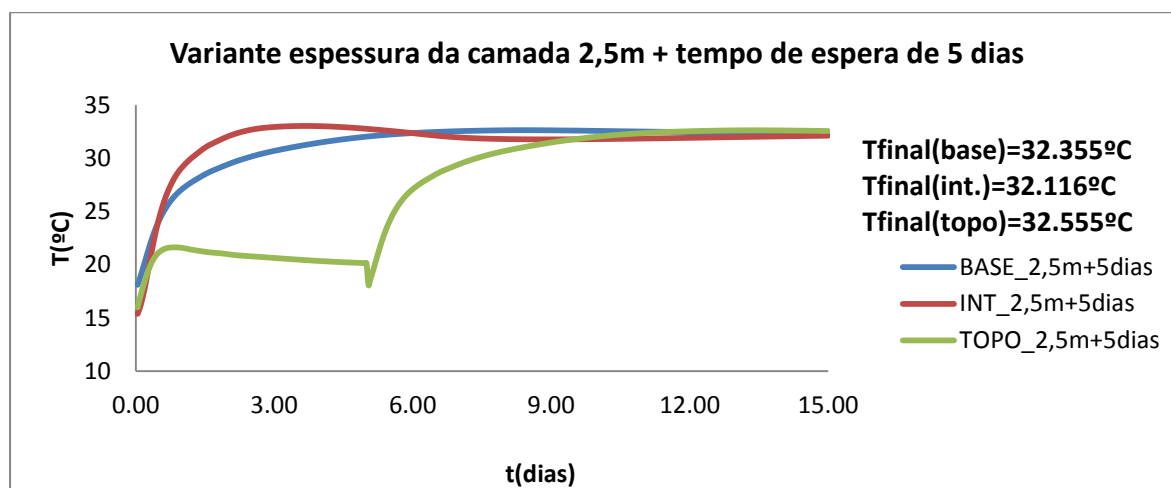


Fig.4.16- Evolução das temperaturas considerando uma variação da espessura de 2,5m e um tempo de espera de 5 dias.

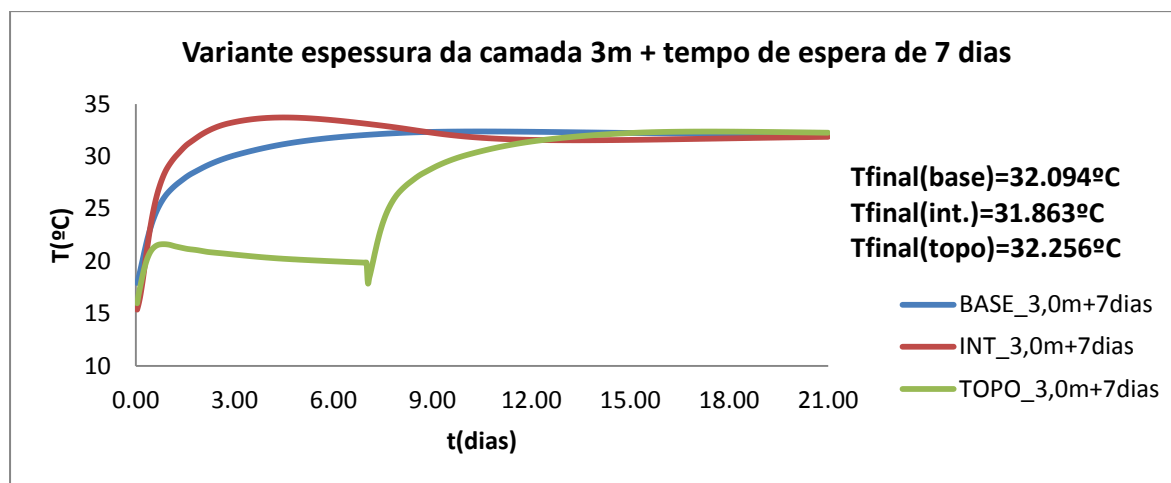


Fig. 4.17- Evolução das temperaturas considerando uma variação da espessura de 3,0m e um tempo de espera de 7 dias.

Fazendo uma nova comparação para as zona base, intermédia e topo da camada, entre o estudo base e as duas variantes temos:

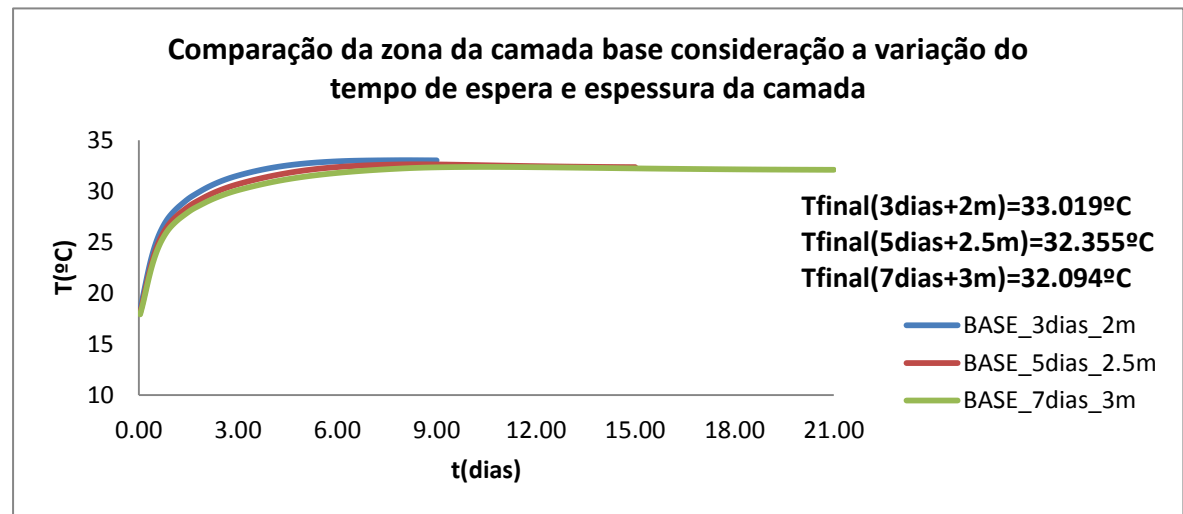


Fig.4.18- Evolução das temperaturas na zona da base da camada.

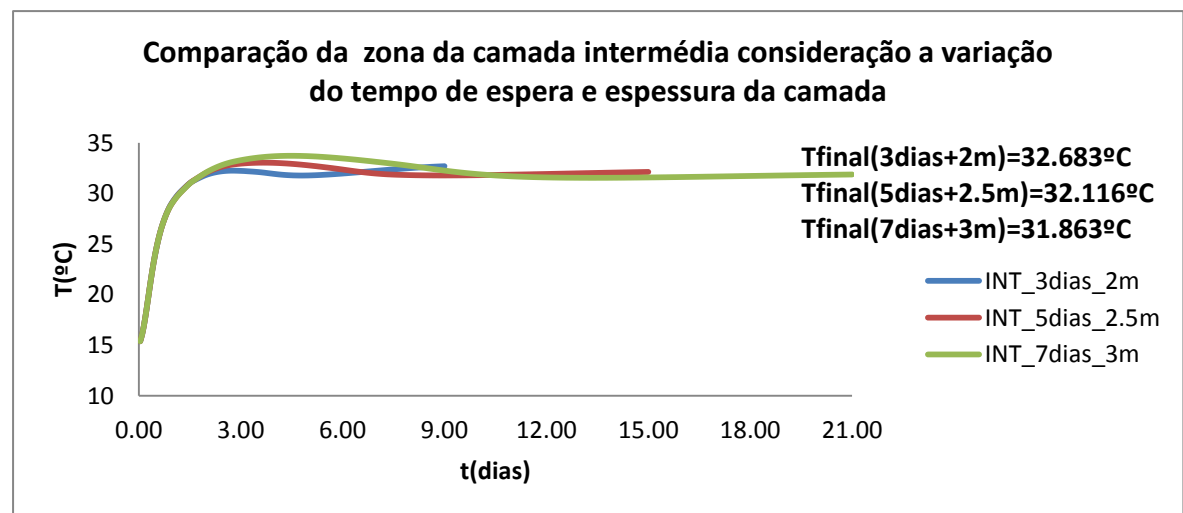


Fig.4.19- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada.

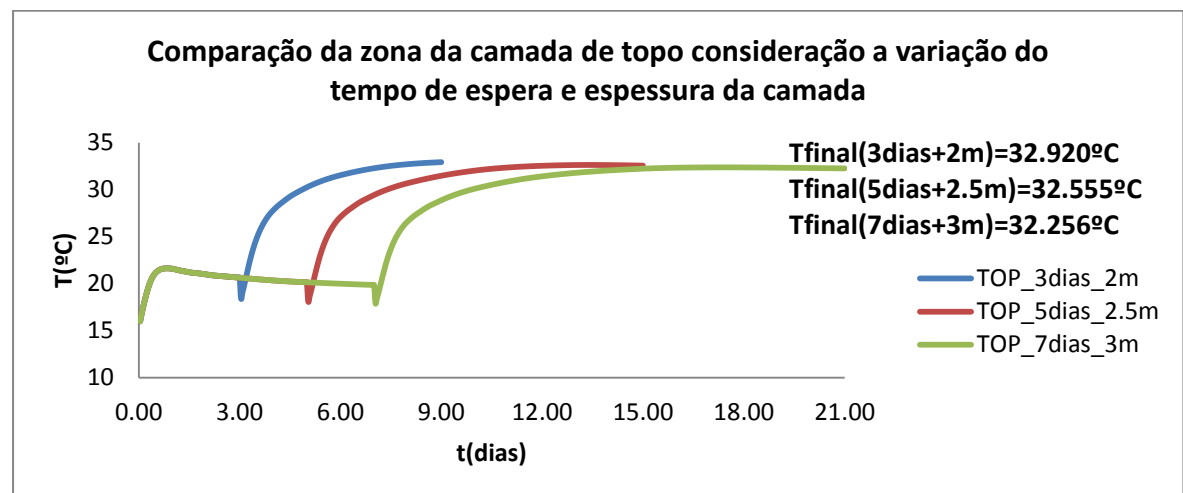


Fig.4.20- Evolução das temperaturas na zona de topo da camada.

Com a evolução destas temperaturas, conclui-se que as temperaturas que se desenvolvem para as variantes não se alteram muito em relação ao estudo base o que poder-se-ia tornar uma alternativa viável. No entanto, apenas a análise mecânica permitirá efetuar conclusões definitivas.

4.2.7 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA INTERIOR

Um dos parâmetros que afetam as temperaturas que se desenvolvem no betão é a temperatura de colocação. A sua evolução é a seguinte:

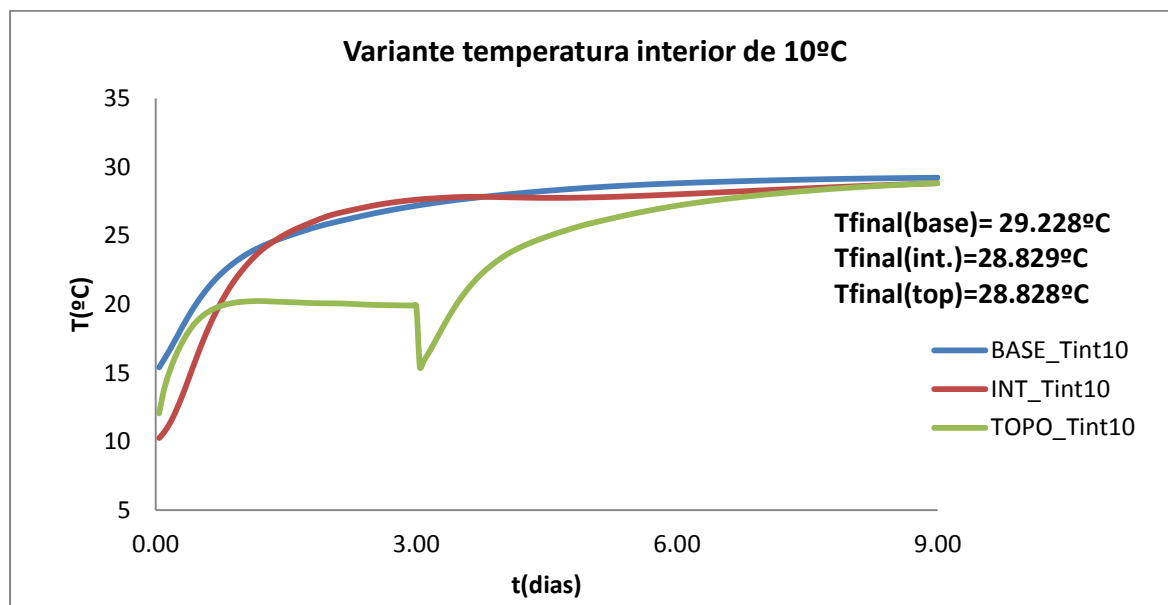


Fig.4.21- Evolução das temperaturas para uma temperatura de colocação de 10°C.

Fazendo agora a habitual comparação para as várias zonas da camada entre o estudo base e a variante acima mencionada temos:

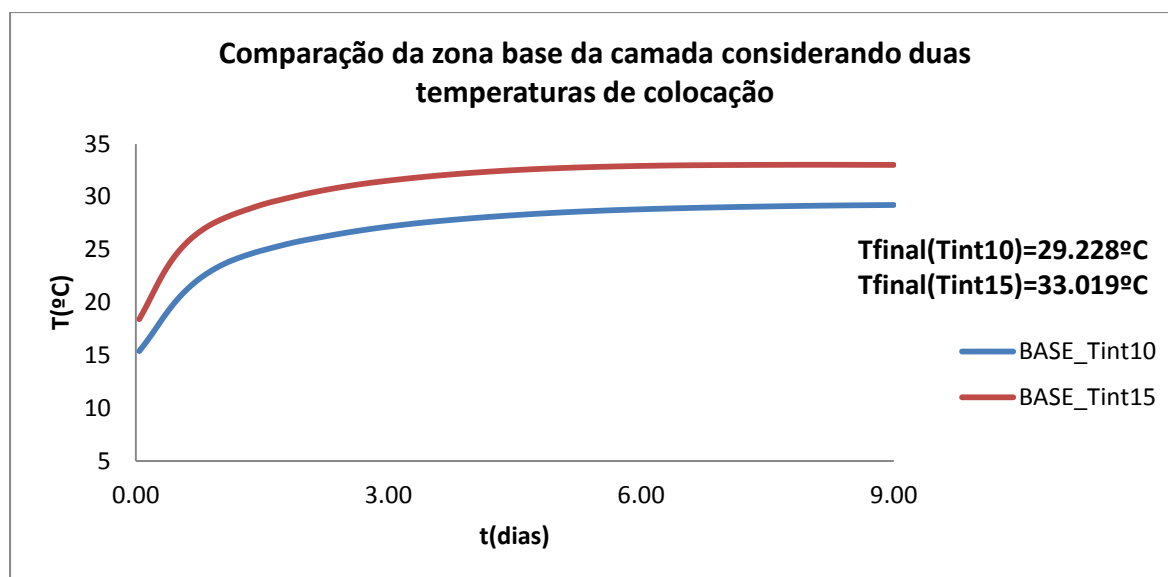


Fig.4.22- Evolução das temperaturas na zona da base da camada.

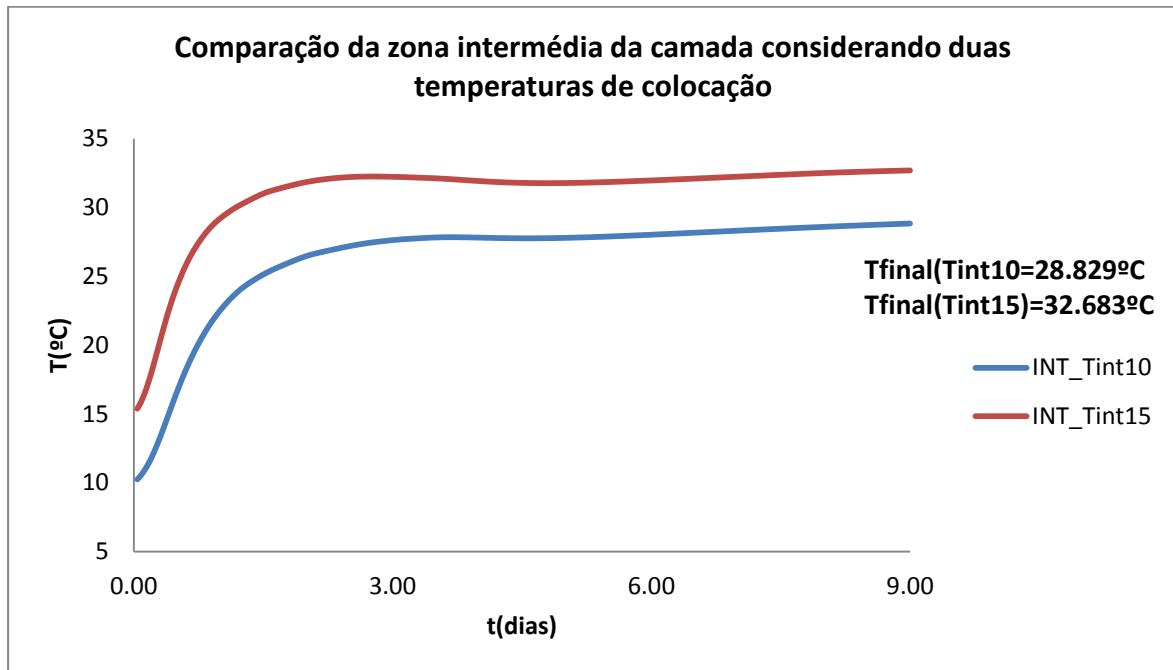


Fig.4.23- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada.

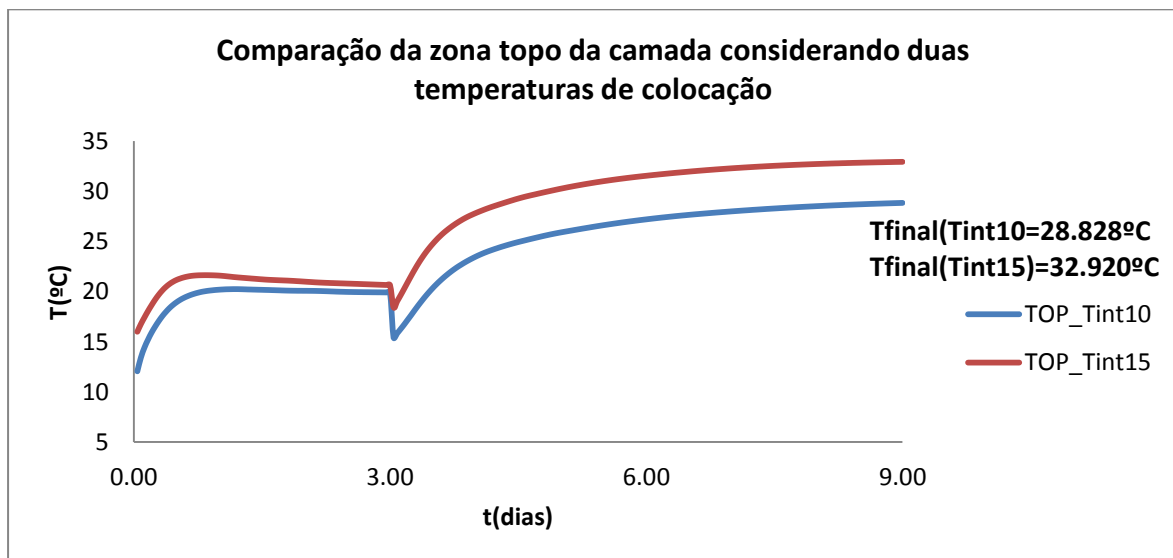


Fig.4.24- Evolução das temperaturas na zona de topo da camada.

Com isto, pode verificar-se que face à diferença de temperatura que se verifica nas camadas (cerca de 4°C), este parâmetro da temperatura de colocação é um fator preponderante no que diz respeito à temperatura máxima que se atinge.

4.2.8. EFEITO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO-RADIAÇÃO

Até aqui, os estudos foram efetuados apenas com o coeficiente de convecção, que como foi dito anteriormente vale 16.5 W/m².K. Agora, irá ser introduzido o coeficiente de radiação e irá ser avaliado a evolução das temperaturas novamente para verificar se este coeficiente introduz alguma variação significativa nas temperaturas anteriormente analisadas.

Recorrendo à expressão (2.17) e tendo em conta uma temperatura ambiente média de 18°C (291 K) chega-se a um coeficiente de radiação que vale 5.1 W/m².K. Sendo assim, recorrendo agora à expressão (2.15), tem-se que o coeficiente de convecção-radiação vale 21.6 W/m².K.

Analisando agora a comparação entre as várias camadas com o estudo base, tem-se:

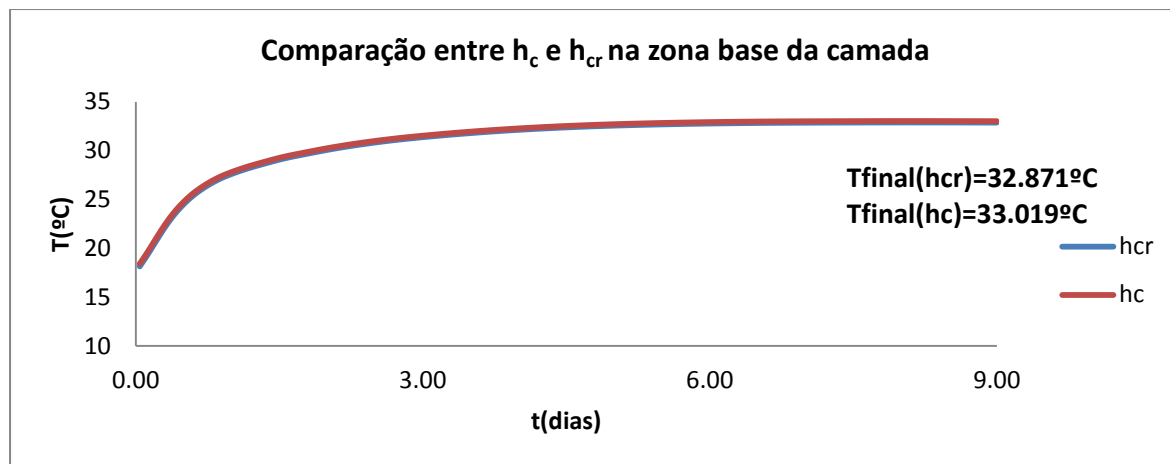


Fig.4.25- Comparação entre h_c e h_{cr} na zona base da camada.

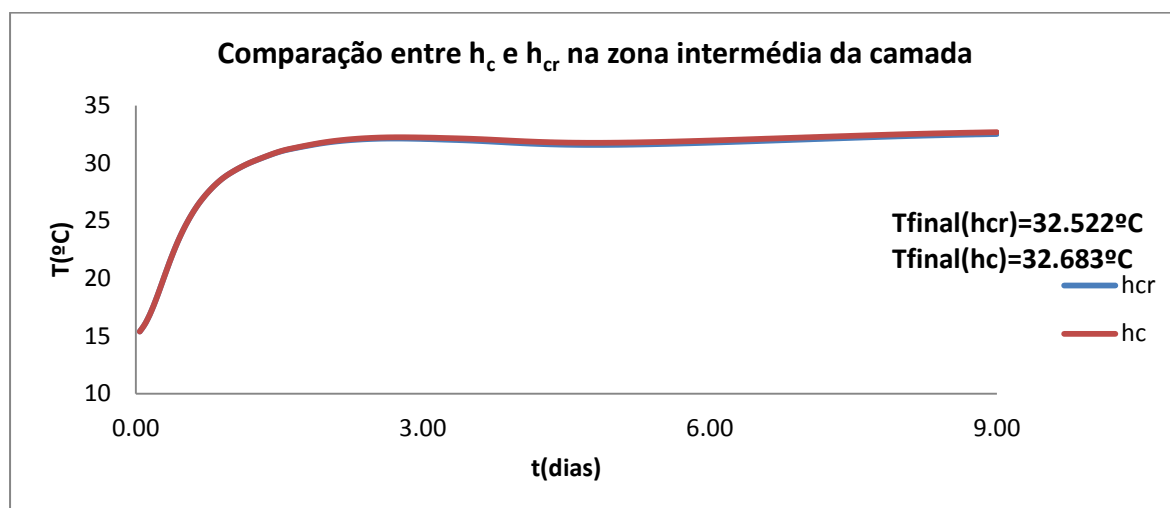


Fig.4.26- Comparação entre h_c e h_{cr} na zona intermédia da camada.

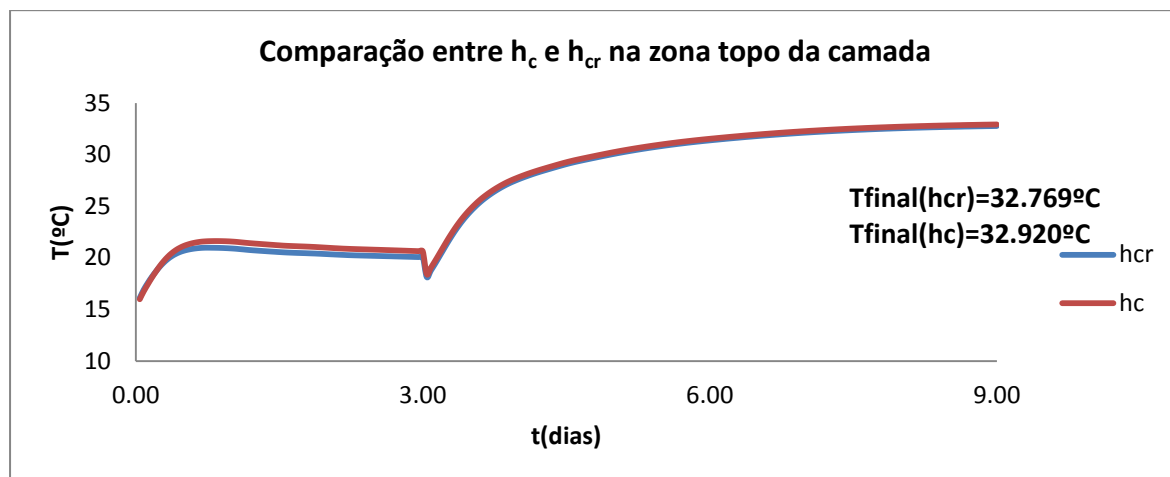


Fig.4.27- Comparação entre h_c e h_{cr} na zona topo da camada.

Analisando os gráficos, é possível concluir que esta alteração do coeficiente de convecção não introduz quase nenhuma diferença na evolução das temperaturas. Destaque apenas para uma diferença de temperaturas na zona topo da camada nos primeiros três dias, mas que se acaba também por traduzir numa diferença mínima.

4.2.9. VARIANTE CONDIÇÕES EXTREMAS

Uma outra análise passa por avaliar o comportamento do betão face a temperaturas extremas. Para tal, foram efetuadas análises numa situação de verão em que a temperatura ambiente é 30°C e a temperatura de colocação é de 15°C, e numa situação de inverno em que a temperatura ambiente é de 5°C e a temperatura de colocação é de 10°C. As suas evoluções são as seguintes:

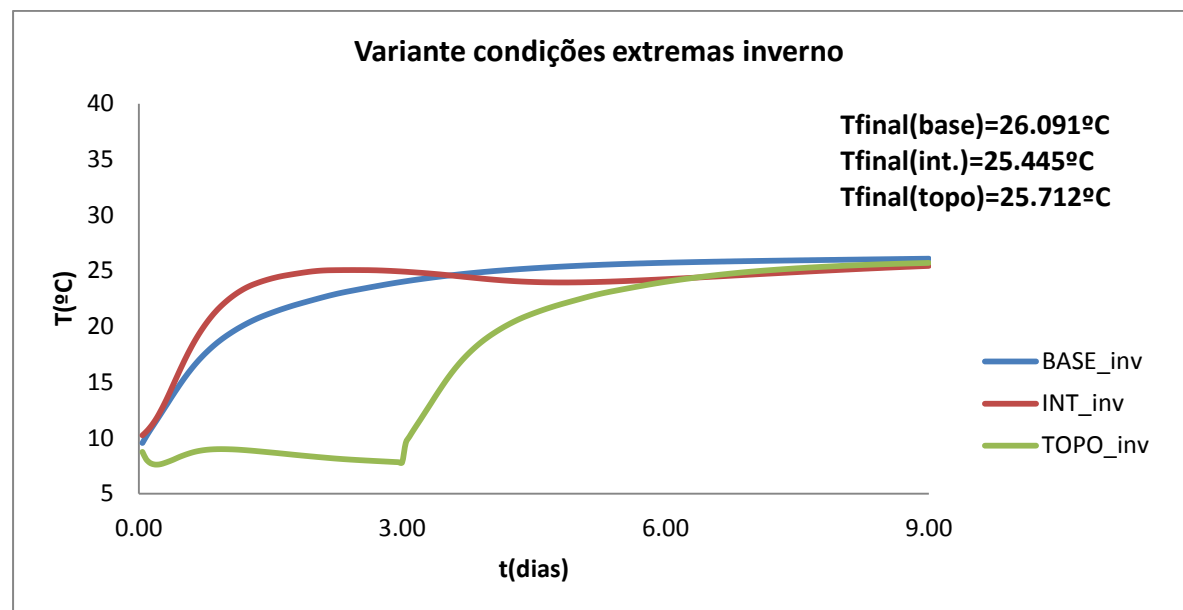


Fig.4.28- Evolução das temperaturas numa situação de inverno.

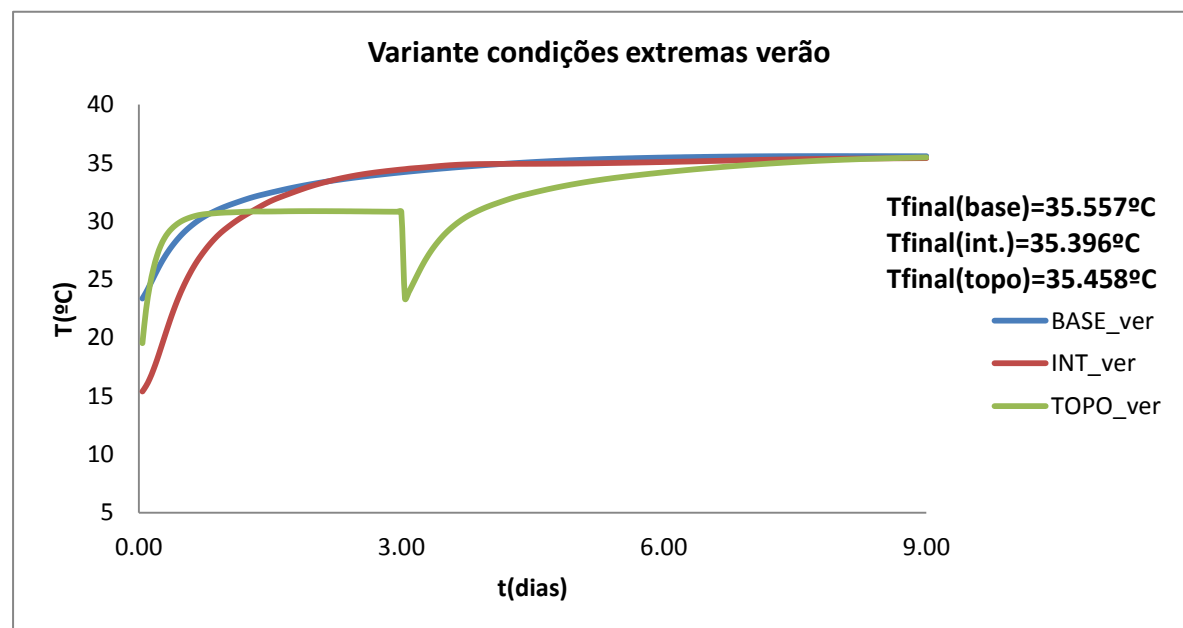


Fig.4.29- Evolução das temperaturas numa situação de verão.

Analisando a sua evolução, verifica-se que a zona topo nos três primeiros dias é mais afetada pela temperatura exterior, quer no inverno, quer no verão uma vez que a superfície está exposta à temperatura ambiente. Na zona da base temos uma evolução na situação de verão semelhante à do estudo base em que a temperatura na base é maior inicialmente, devido à explicação feita aquando da análise da evolução do estudo base. Já na situação de inverno, devido a baixa temperatura ambiente, a temperatura na zona intermédia é superior nos três primeiros dias sendo mais baixa aquando da colocação de outra camada por cima.

Após esta análise, procedeu-se então a outra análise que passa pela modelação da variação diária das temperaturas através de uma senoide. O objetivo desta análise é verificar se esta trará alguma alteração importante relativo a este estudo acima efetuado. Para modelação da senoide, utilizou-se a expressão:

$$T(t) = T_M + A \sin(w(t - t_{tM})) \quad (4.1)$$

em que:

T-temperatura ao longo do tempo (°C)

T_M - temperatura média diária (°C)

A- amplitude diária

w- frequência angular

t_{tM} – altura em que atinge a temperatura média diária (horas)

t – tempo (horas)

Recorrendo à expressão anterior, as condições usadas para o inverno e verão foram, prospectivamente:

Quadro 4.2- Parâmetros da senoide para o inverno.

T_M	5.0°C
A	3.0
w	0.262
t_{tM}	7.00 h

Quadro4.3- Parâmetros da senoide para o verão.

T_M	30.0°C
A	10.0
w	0.262
t_{tM}	9.00 h

Pelo que a evolução de temperaturas é a seguinte:

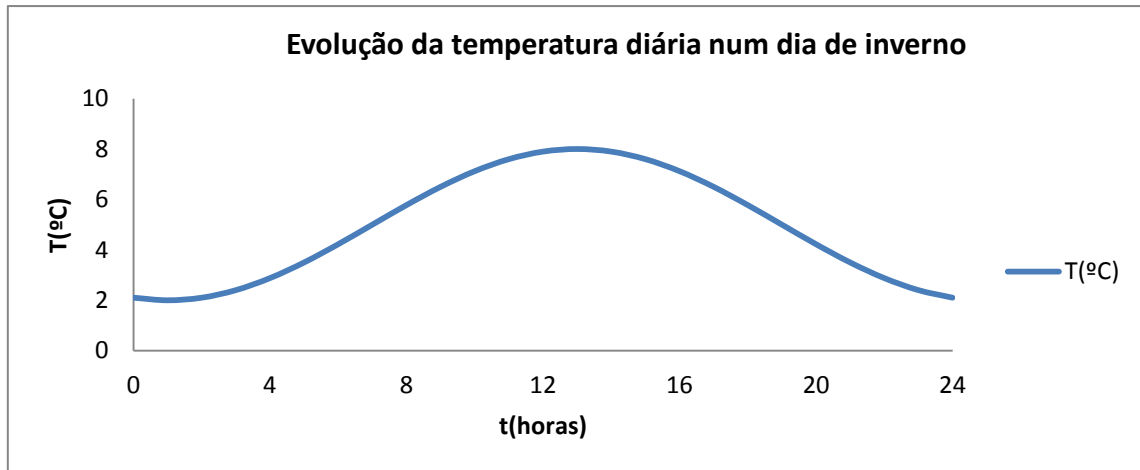


Fig.4.30- Evolução das temperaturas diárias no inverno.

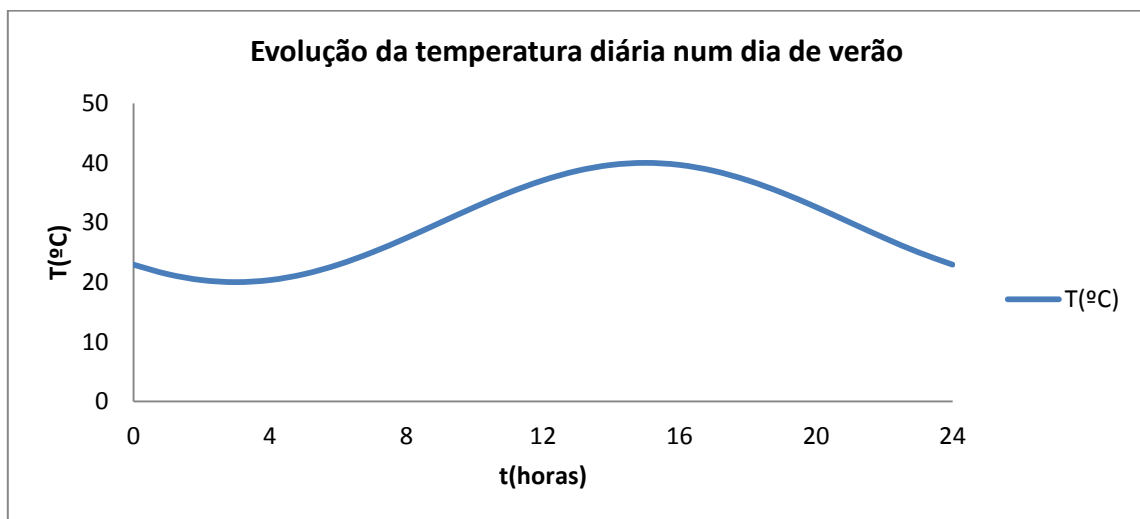


Fig.4.31- Evolução das temperaturas diárias no verão.

Pelo que a evolução das temperaturas ficam:

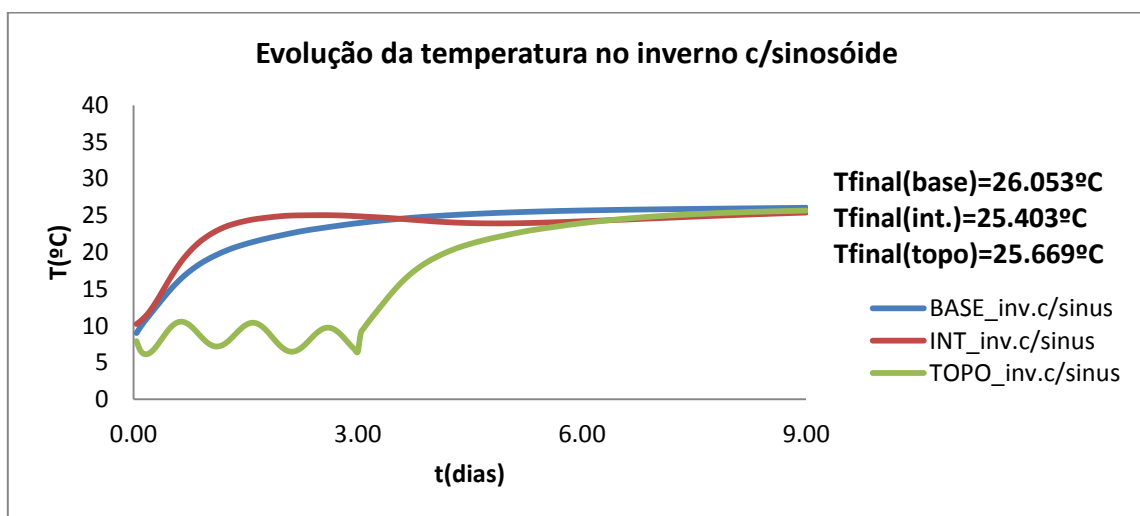


Fig.4.32- Evolução das temperaturas considerando a sinusoide no inverno.

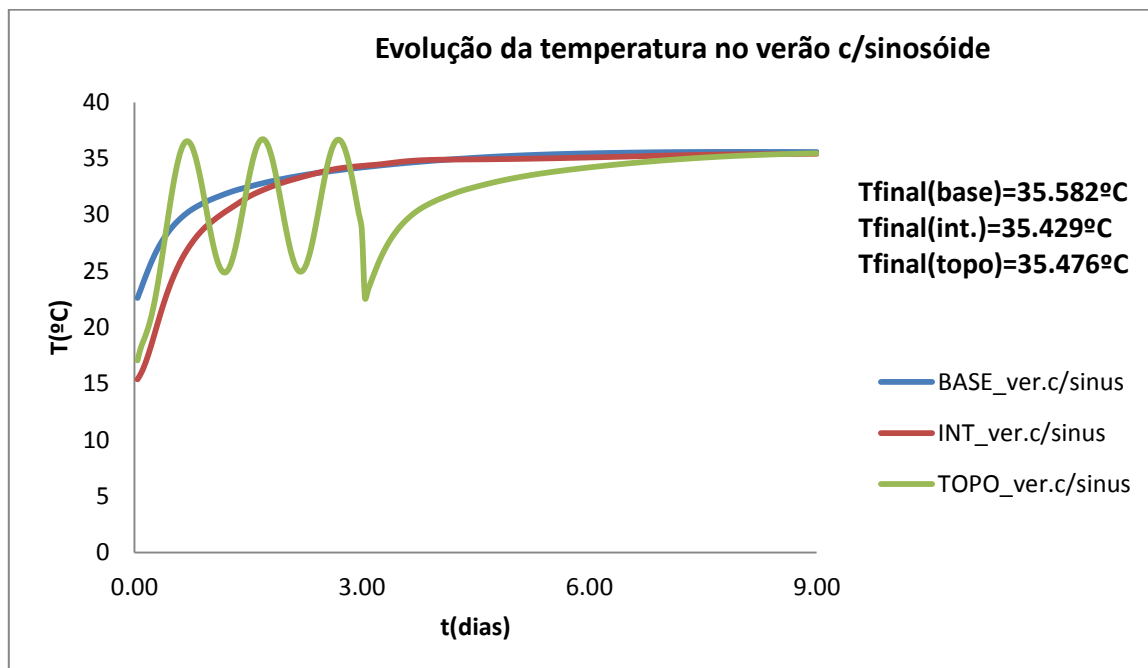


Fig.4.33- Evolução das temperaturas considerando a senoide no verão.

Fazendo agora a comparação para as várias zonas da camada entre as condições extremas com temperatura ambiente constante e considerando a senoide diária, tem-se que para condições de inverno:

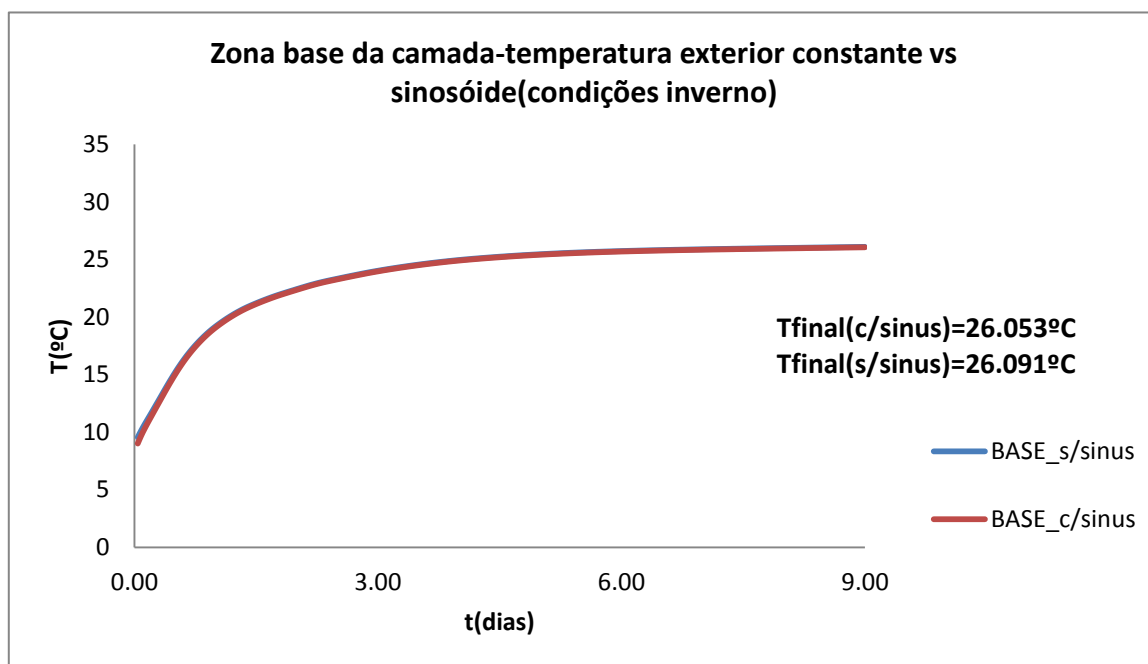


Fig.4.34- Evolução das temperaturas na zona base da camada com e sem senoide.

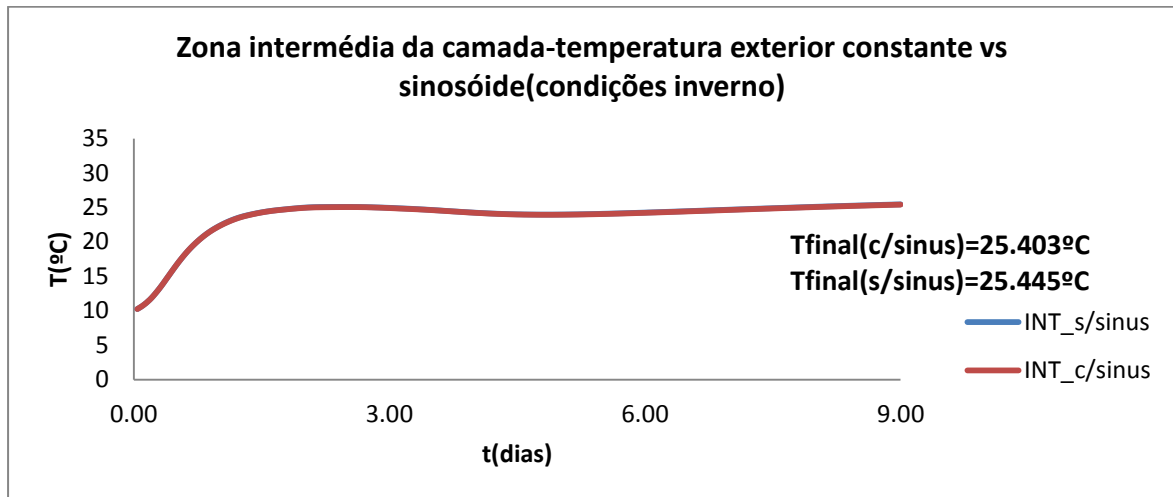


Fig.4.35- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada com e sem sinusóide.

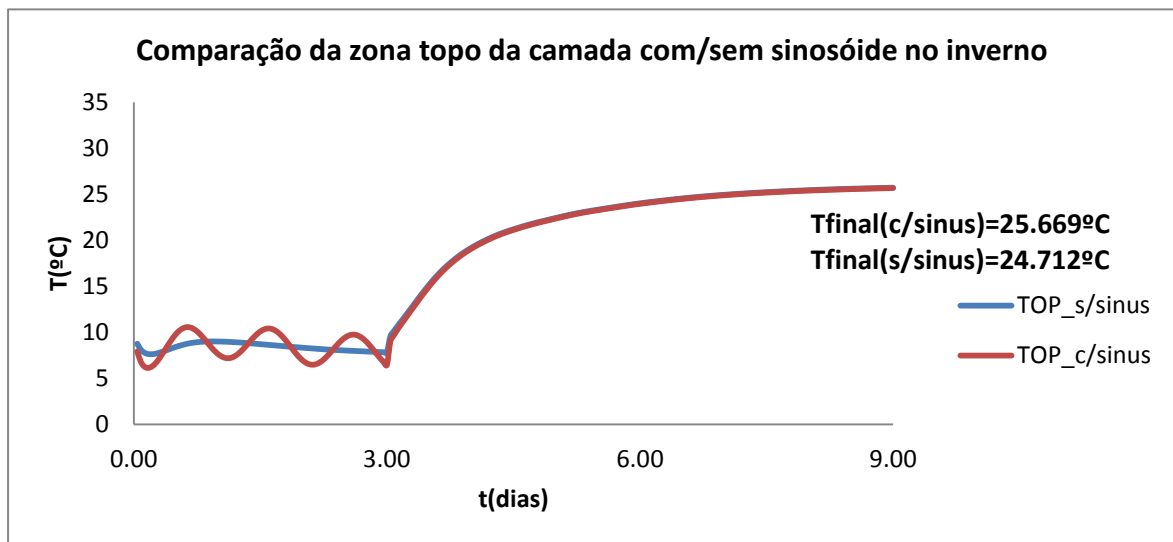


Fig.4.36- Evolução das temperaturas na zona topo da camada com e sem sinusóide.

Considerando agora as condições de verão:

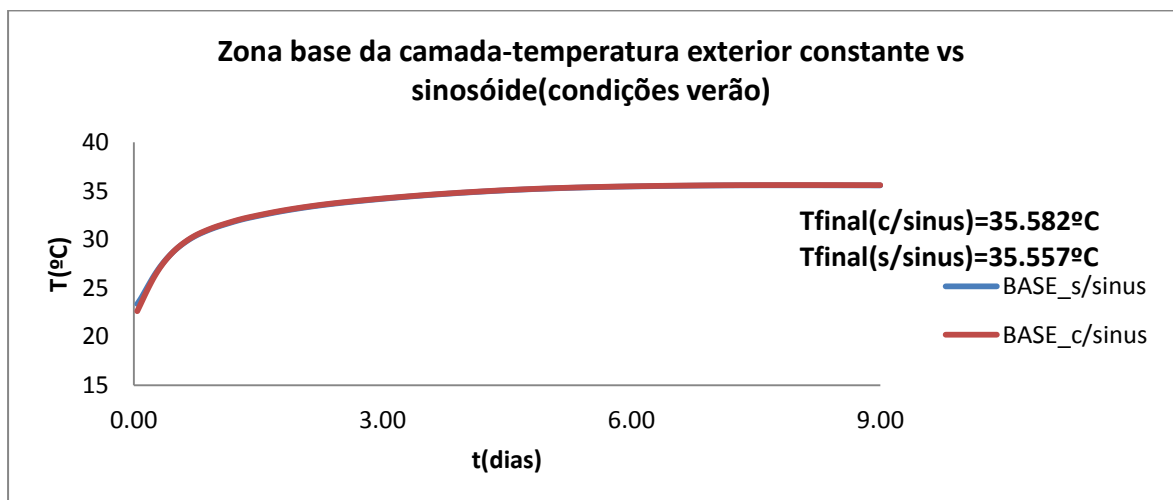


Fig.4.37- Evolução das temperaturas na zona base da camada com e sem sinusóide.

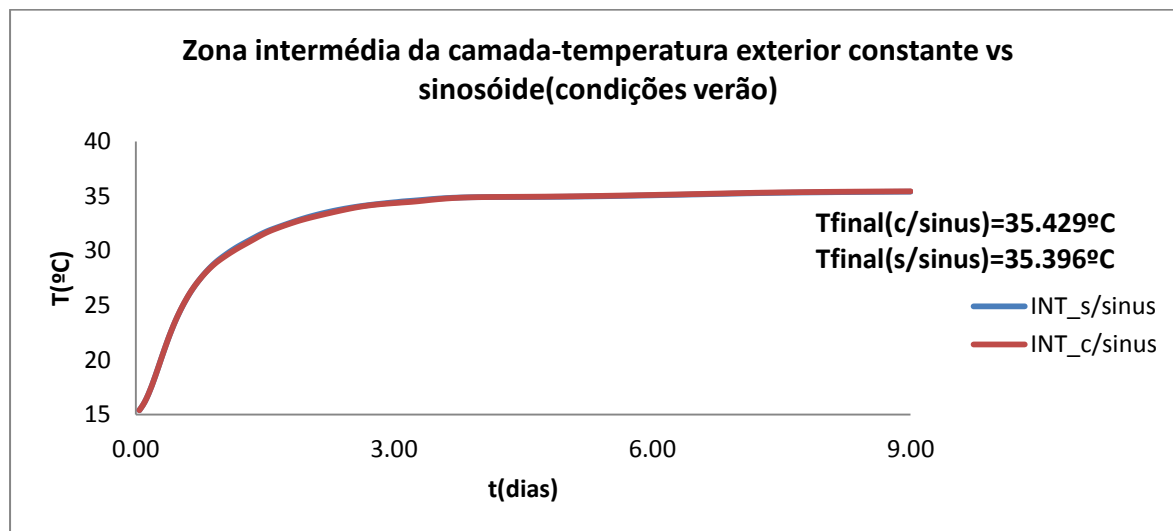


Fig.4.38- Evolução das temperaturas na zona intermédia da camada com e sem senoide.

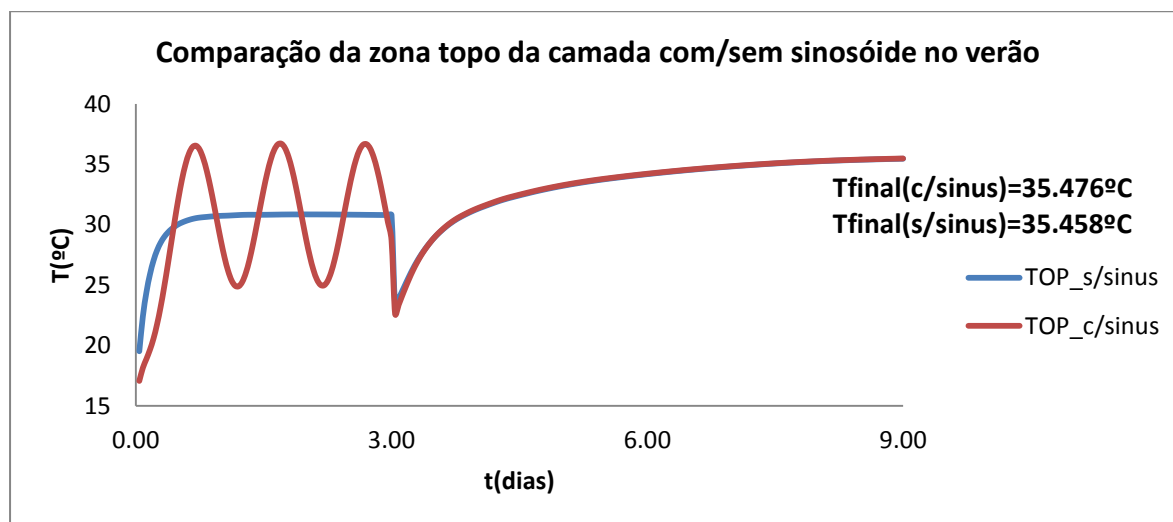


Fig.4.39- Evolução das temperaturas na zona topo da camada com e sem senoide.

Observando estas evoluções de temperatura no inverno e no verão, pode verificar-se que a introdução da senoide diária introduz pouca ou nenhuma variação nas zonas base e intermédia da camada. No caso da camada de topo, tem-se que nos primeiros 3 dias, a sua temperatura oscila conforme a temperatura ambiente e, comparando com a situação em que a temperatura exterior é constante, também se pode verificar que a senoide oscila em torno dessa temperatura média exterior. Passados os 3 dias, é betonada nova camada e a temperatura segue a sua evolução normal. Com este estudo, pode-se concluir que a introdução da senoide no programa de cálculo automático não traz grandes alterações as temperaturas, podendo ser considerado um valor constante durante o dia para a temperatura nas fronteiras.

4.2.10 VARIANTE RADIAÇÃO SOLAR

Após a avaliação das temperaturas com a consideração de uma senoide, com o objetivo de aproximar o estudo um pouco mais da realidade, considera-se agora o efeito da radiação solar. Para a avaliação da radiação solar, consideraram-se as expressões referidas no subcapítulo 2.1.5.2.

Para este estudo foram consideradas quatro situações. São elas uma situação de inverno em que se considera um cenário de céu limpo e outra de céu nublado. As duas outras situações são referentes ao verão também em céu limpo e céu nublado.

Na situação de inverno apresentam-se os dados considerados para a radiação solar:

Quadro 4.4- Dados para o cálculo da radiação solar no inverno.

α	0°
q_0	1367 W/m^2
Fator de turvação para céu limpo	2
Fator de turvação para céu nublado	9
α_s	0.6
φ	37.53°
dia	10

Pelo que a evolução da radiação solar é a seguinte:

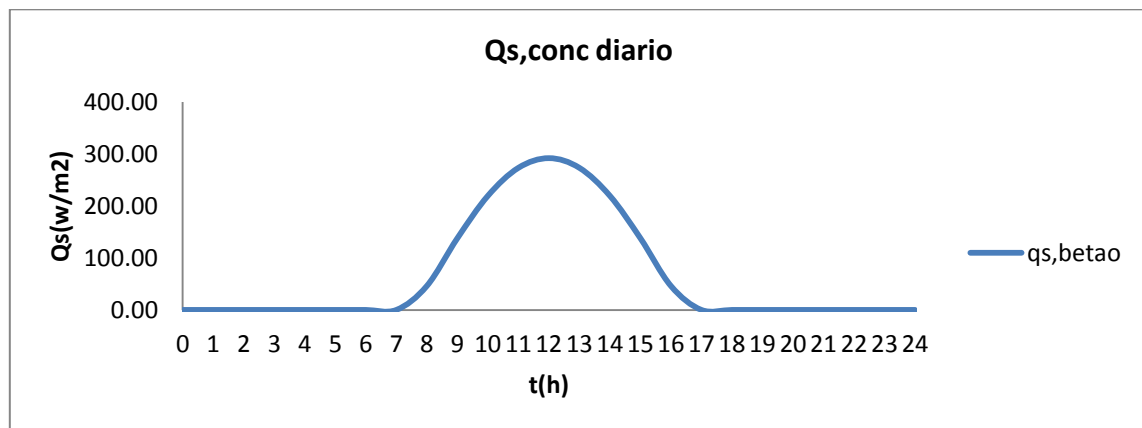


Fig.4.40- Fluxo de calor devido à radiação no inverno com céu limpo.

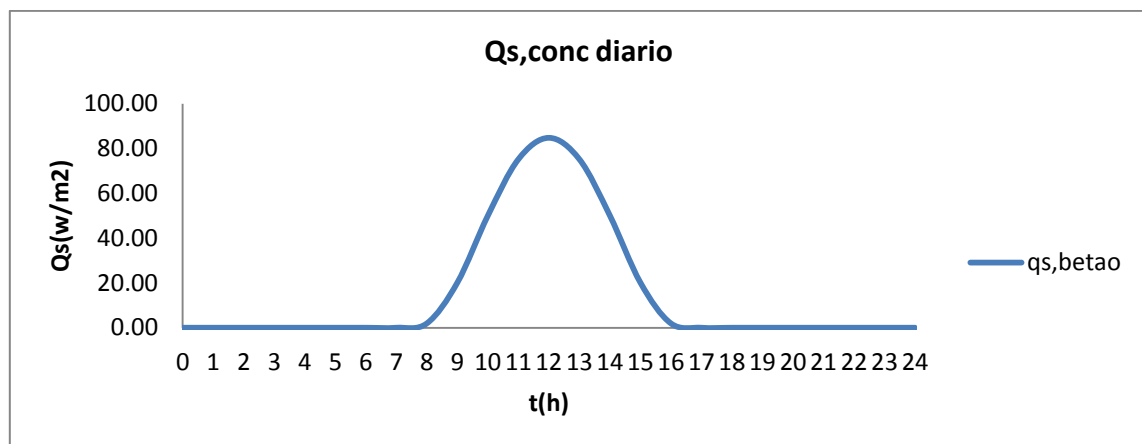


Fig.4.41- Fluxo de calor devido à radiação solar no inverno com céu nublado.

De forma análoga, para uma situação de verão apresentam-se os seguintes dados considerados

Quadro4.5- Dados para o cálculo da radiação solar no verão.

α	0°
q_0	1367 W/m^2
Fator de turvação para céu limpo	2
Fator de turvação para céu nublado	9
α_s	0.6
φ	37.53°
dia	170

Sendo que a evolução fica:

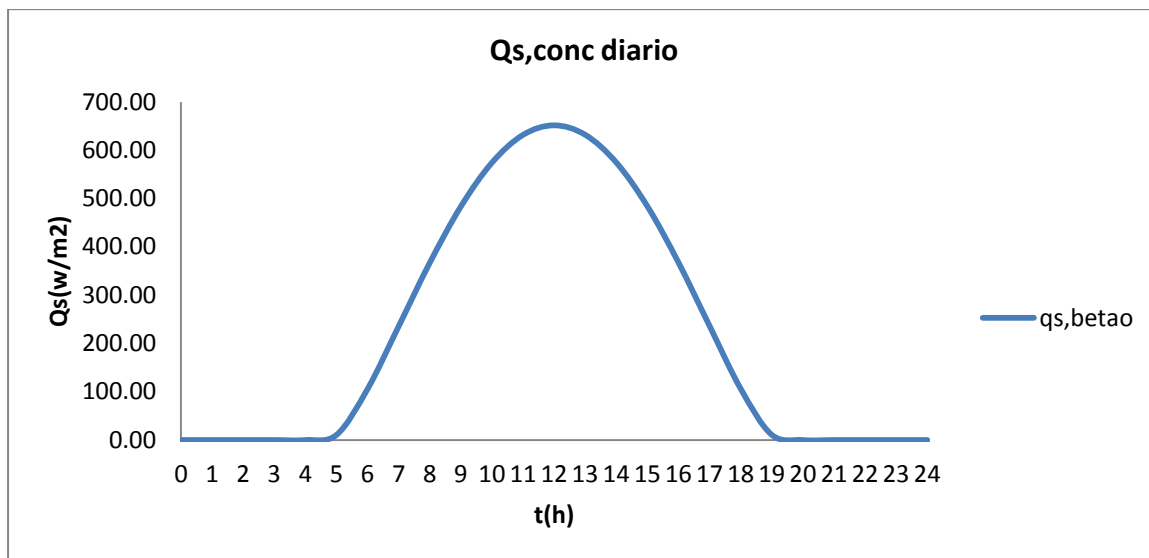


Fig.4.42- Fluxo de calor devido à radiação solar no verão com céu limpo.

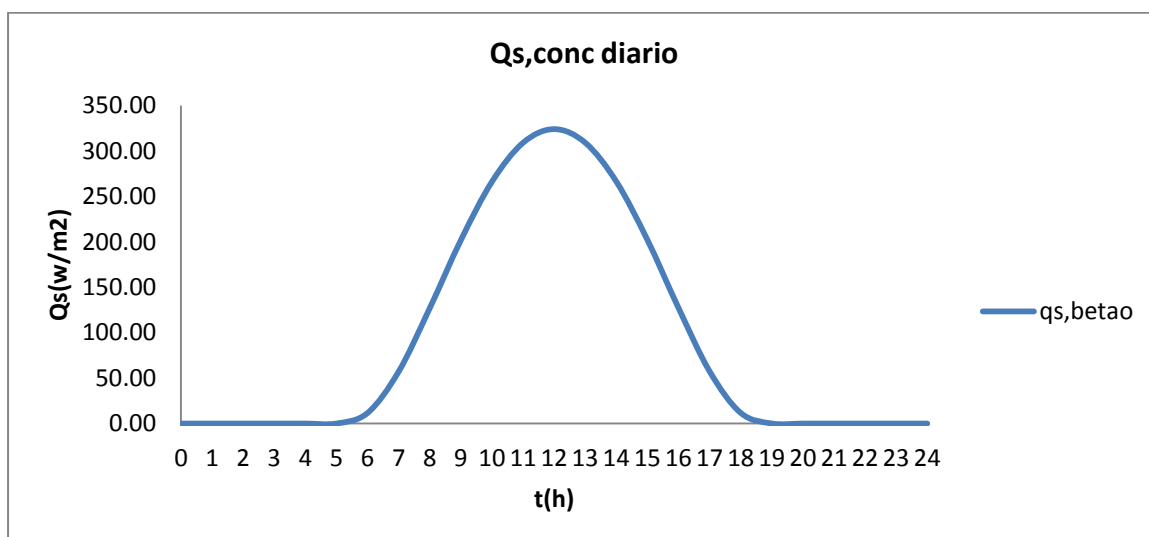


Fig.4.43- Fluxo de calor devido à radiação solar no verão com céu nublado.

Apresentados os gráficos obtidos para o cálculo da radiação solar e após a modelação no programa de cálculo, apresentam-se agora as evoluções das temperaturas calculadas para as quatro situações:

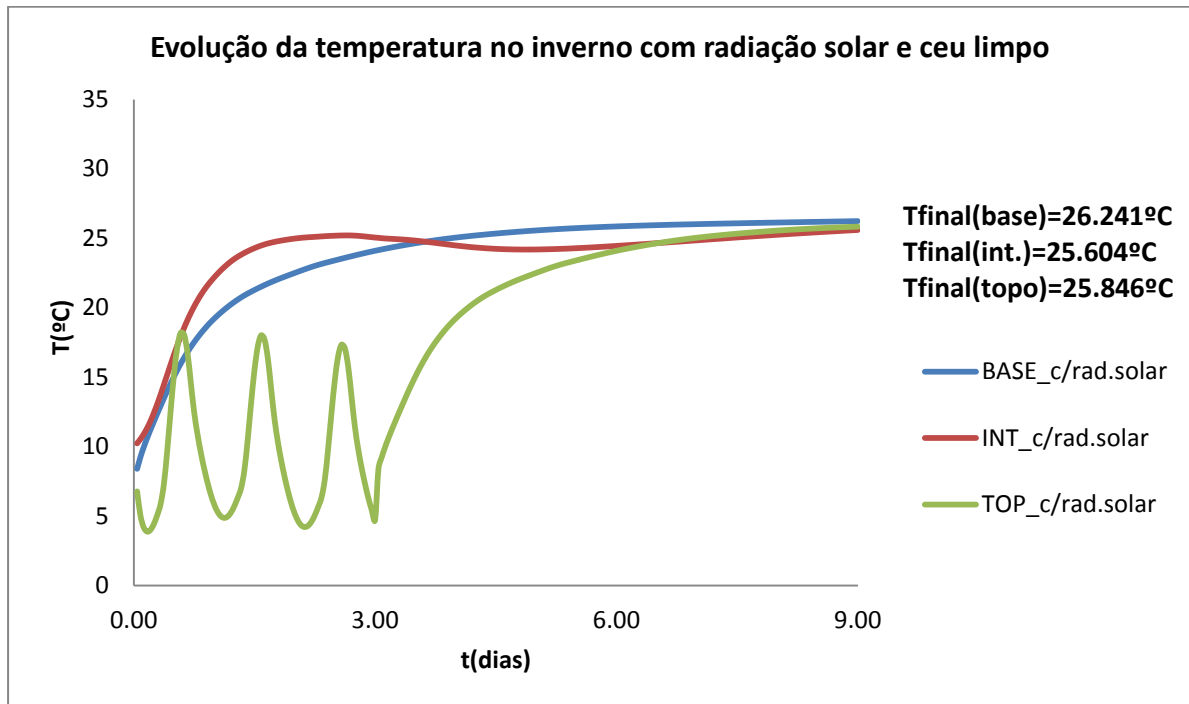


Fig.4.44- Evolução das temperaturas numa situação de inverno considerando a radiação solar para céu limpo.

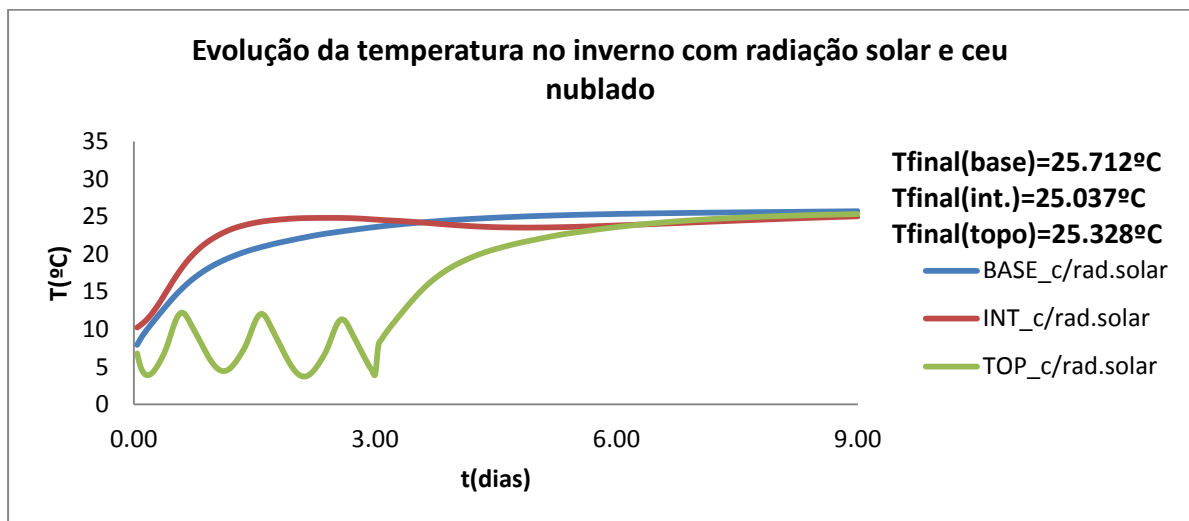


Fig.4.45- Evolução das temperaturas numa situação de inverno considerando a radiação solar para céu nublado.

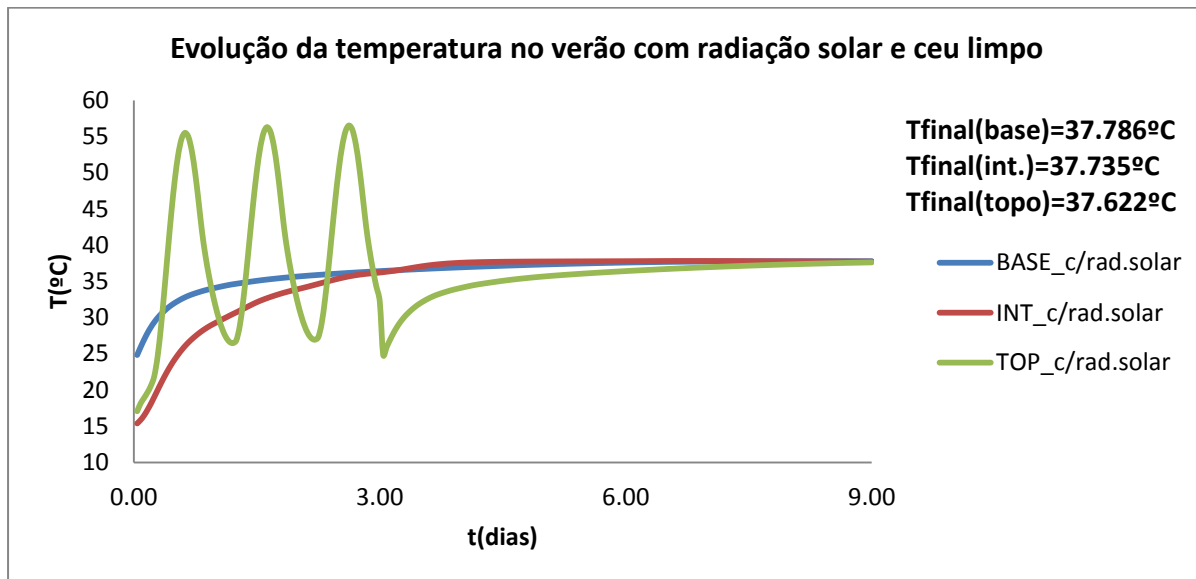


Fig.4.46- Evolução das temperaturas numa situação de verão considerando a radiação solar para céu limpo.

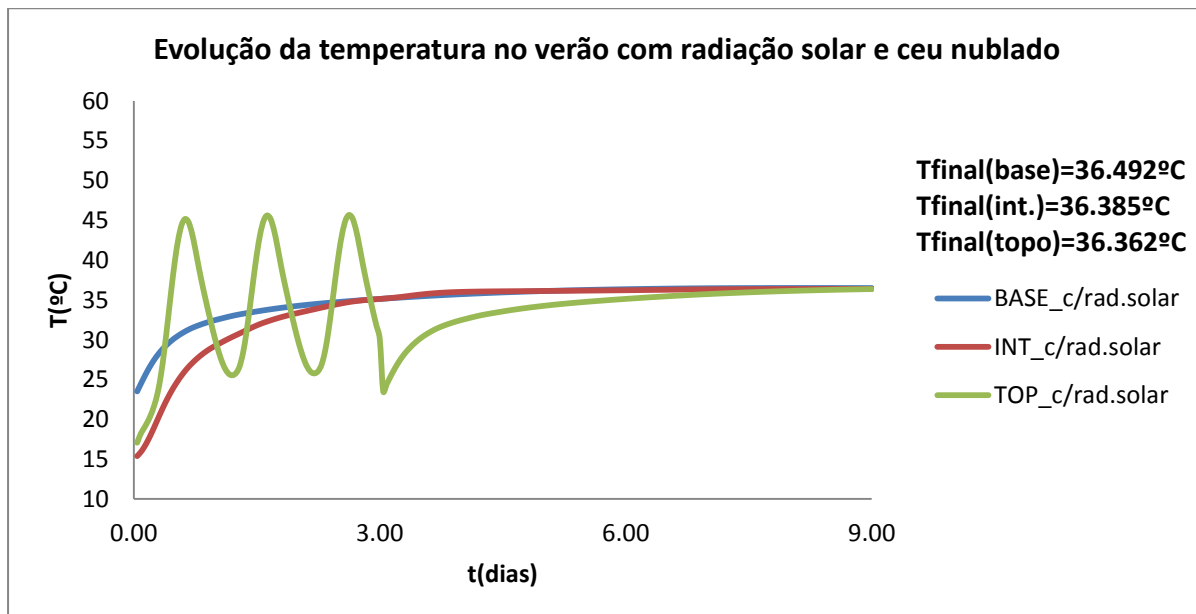


Fig.4.47- Evolução das temperaturas numa situação de verão considerando a radiação solar para céu nublado.

Analisando agora as várias camadas fazendo a comparação entre as condições extremas em que se tem a temperatura constante e as condições extremas com a radiação solar mais a senoide na zona base, intermédia e topo da camada temos para o inverno:

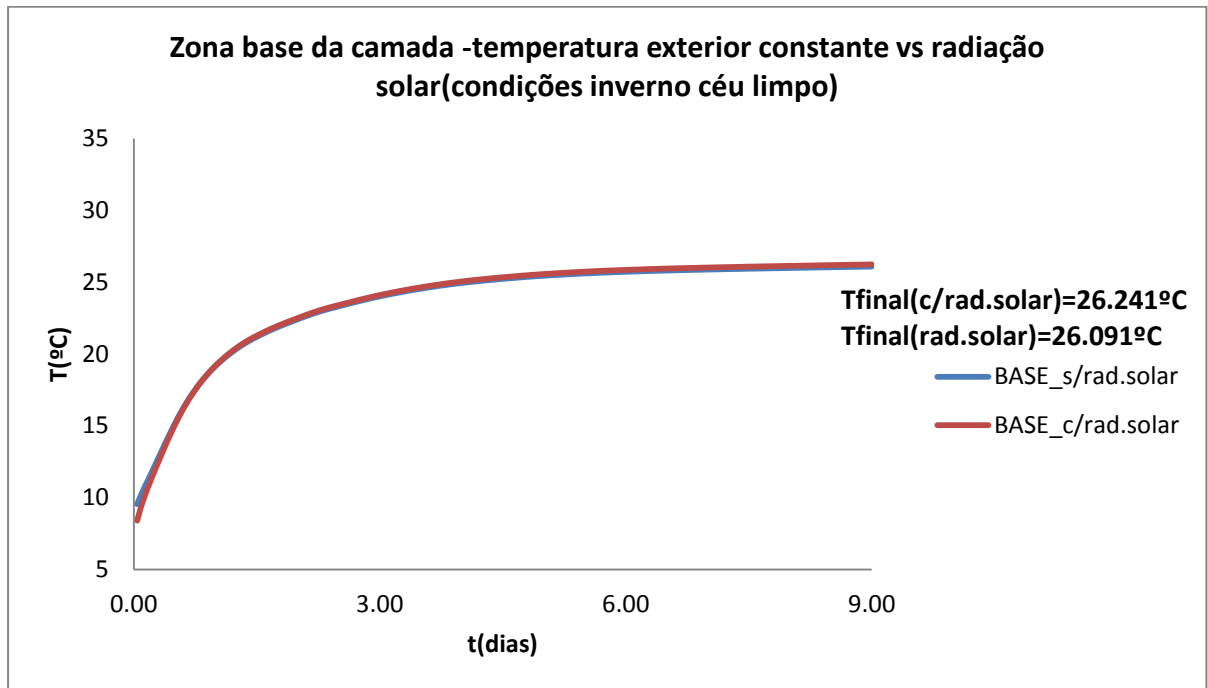


Fig.4.48- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.

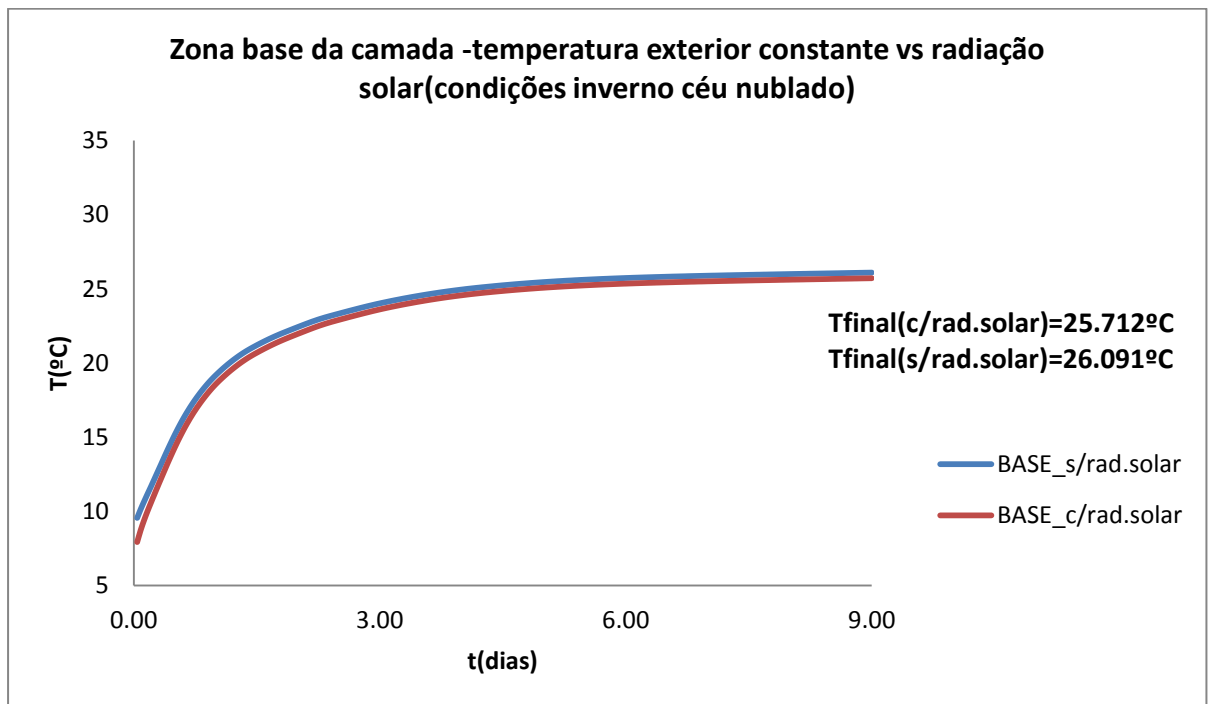


Fig.4.49- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais sinusoide.

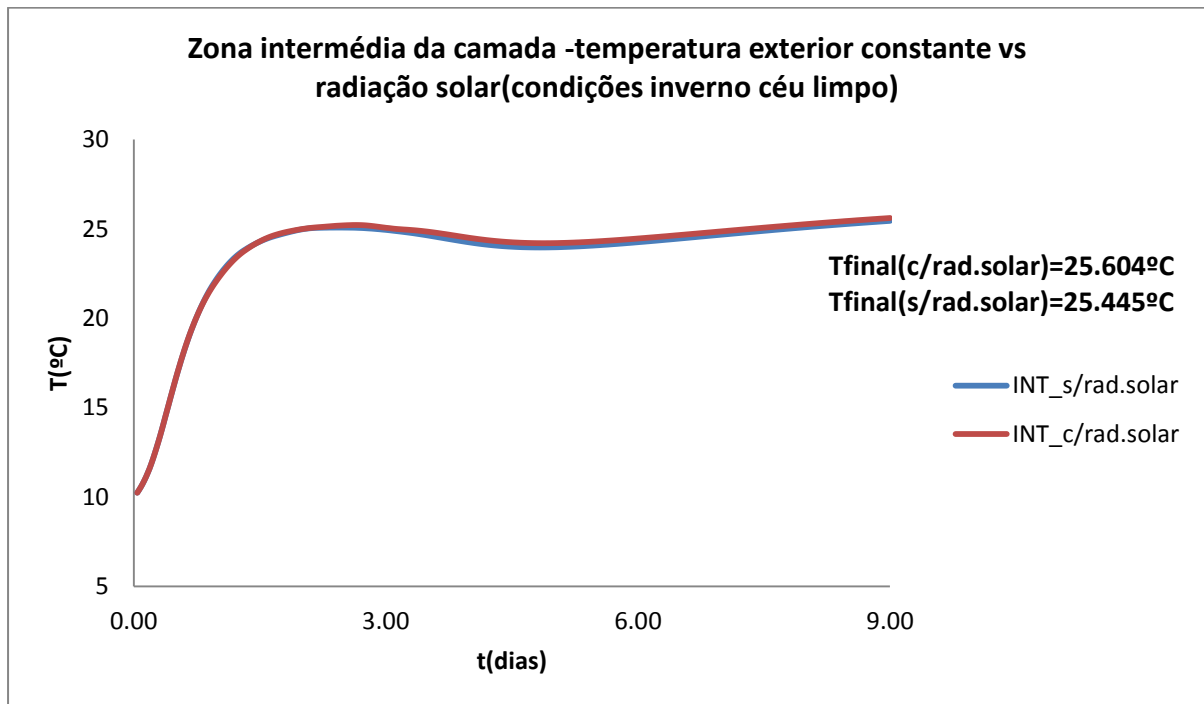


Fig.4.50- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

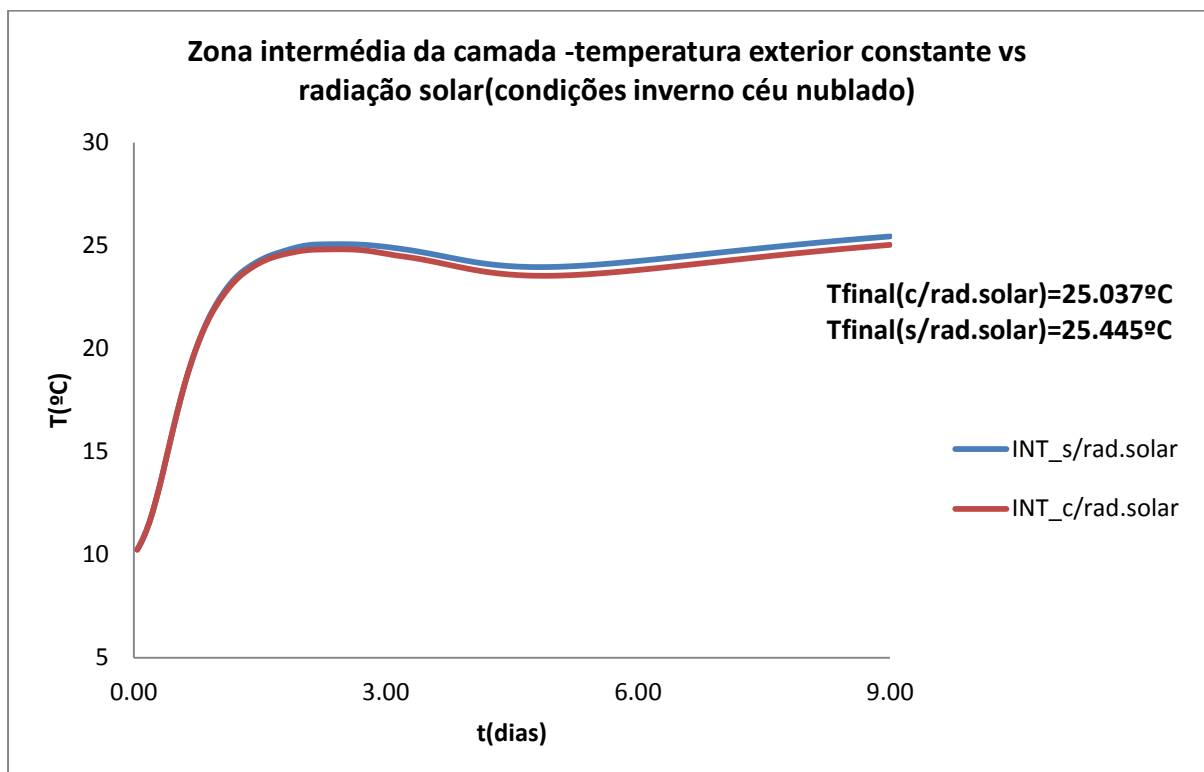


Fig.4.51- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

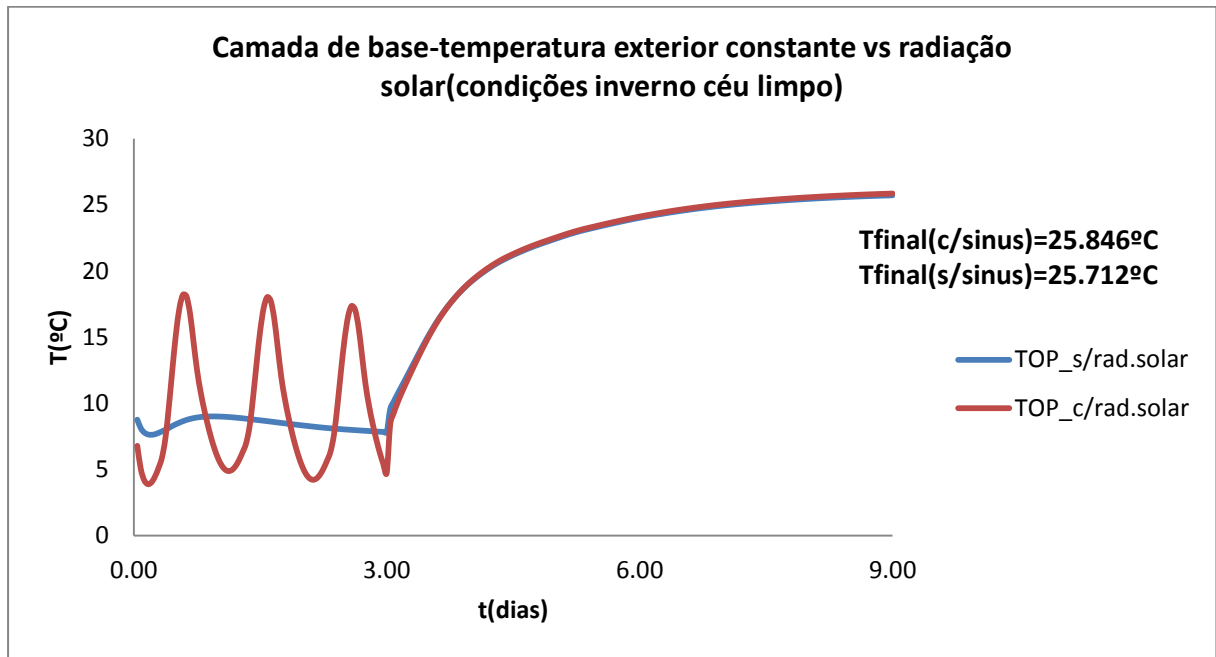


Fig.4.52- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

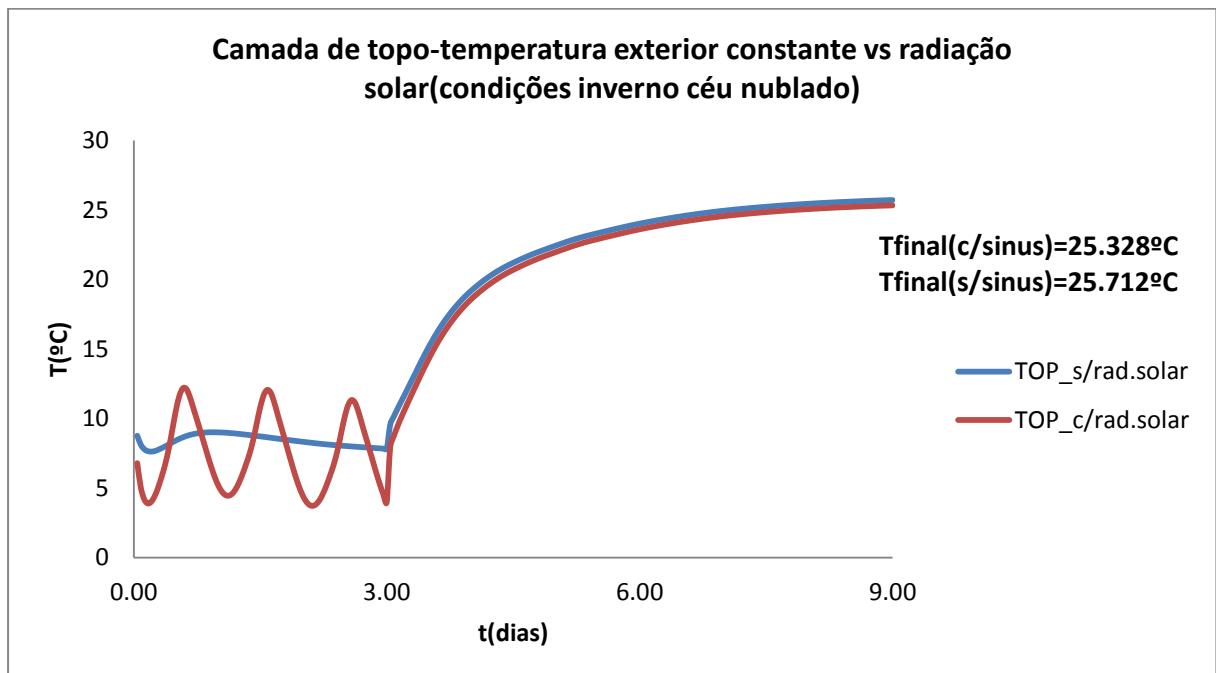


Fig.4.53- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

Fazendo uma análise nestas evoluções, pode-se constatar que numa situação de inverno, com a introdução da radiação solar, as temperaturas não sofrem grandes alterações. Na situação em que há céu limpo as temperaturas com a radiação solar atingem um valor ligeiramente mais elevado. Quando o céu está nublado, as temperaturas mais altas são para a situação em que se considera a temperatura constante. Visto que na situação de inverno, a maior parte dos dias são sempre nublados e chuvosos, pode-se concluir que não é necessário a consideração da radiação solar.

Fazendo agora a mesma análise para o verão:

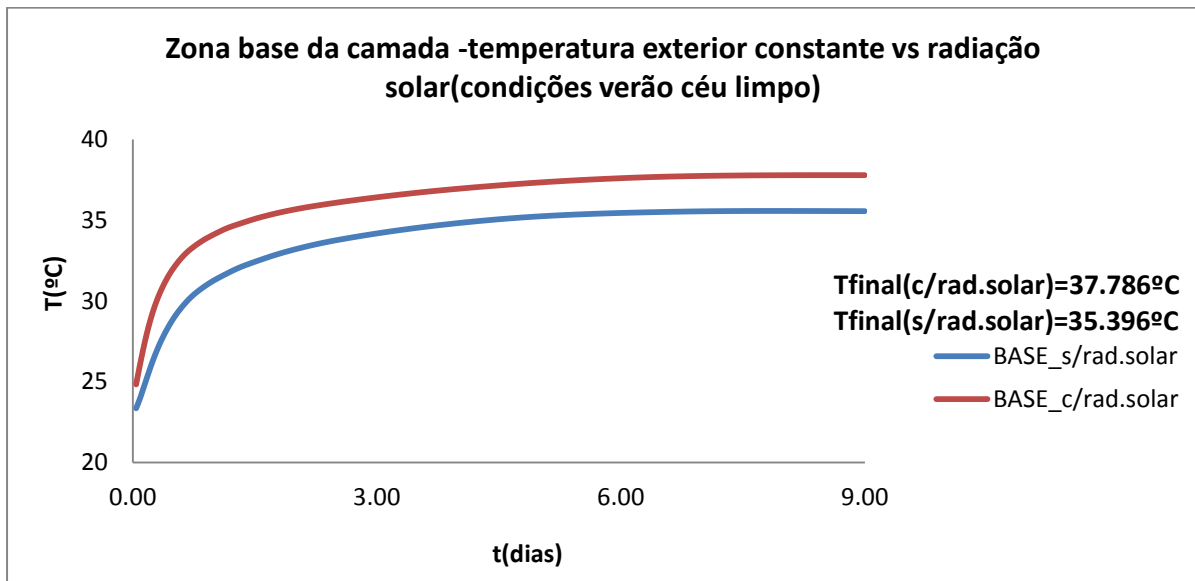


Fig-4.54- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

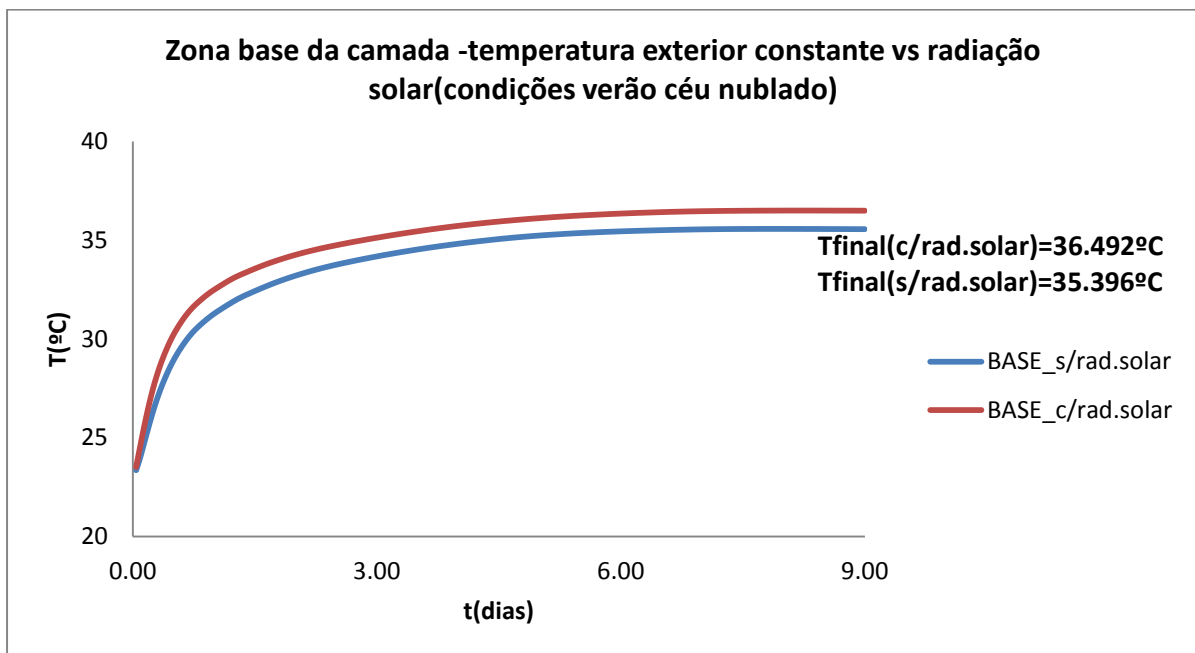


Fig.4.55- Comparação das zonas base da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

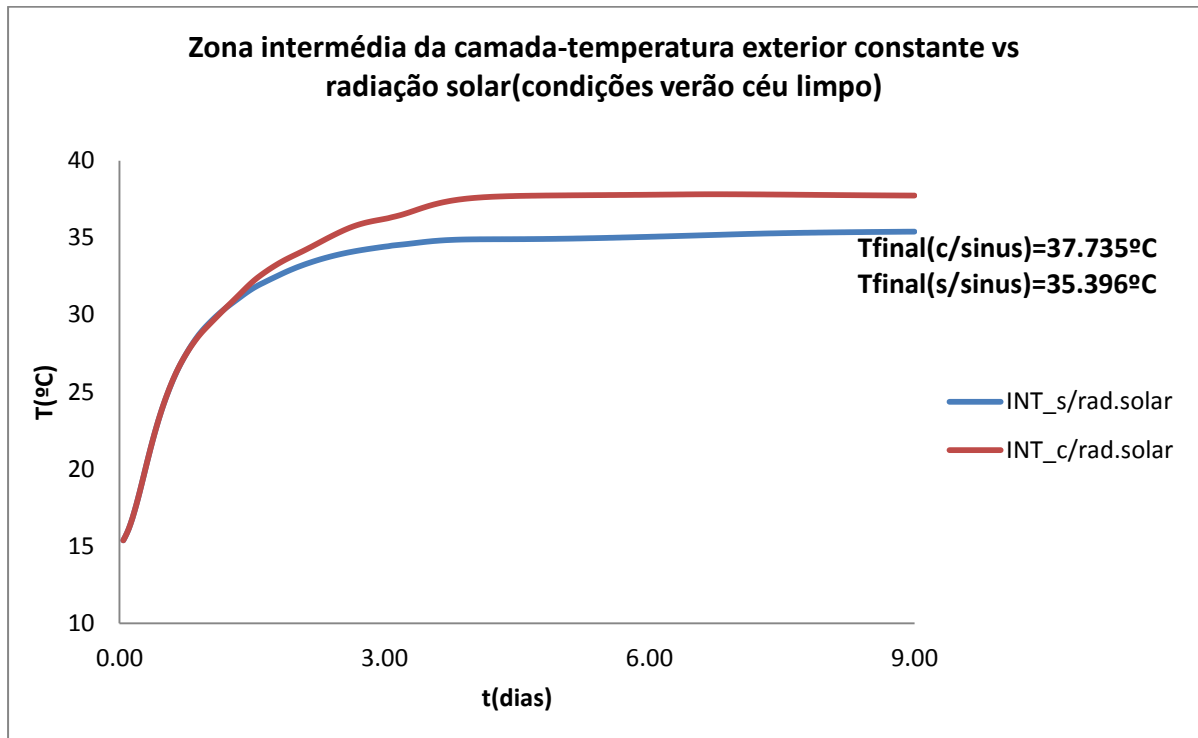


Fig.4.56- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

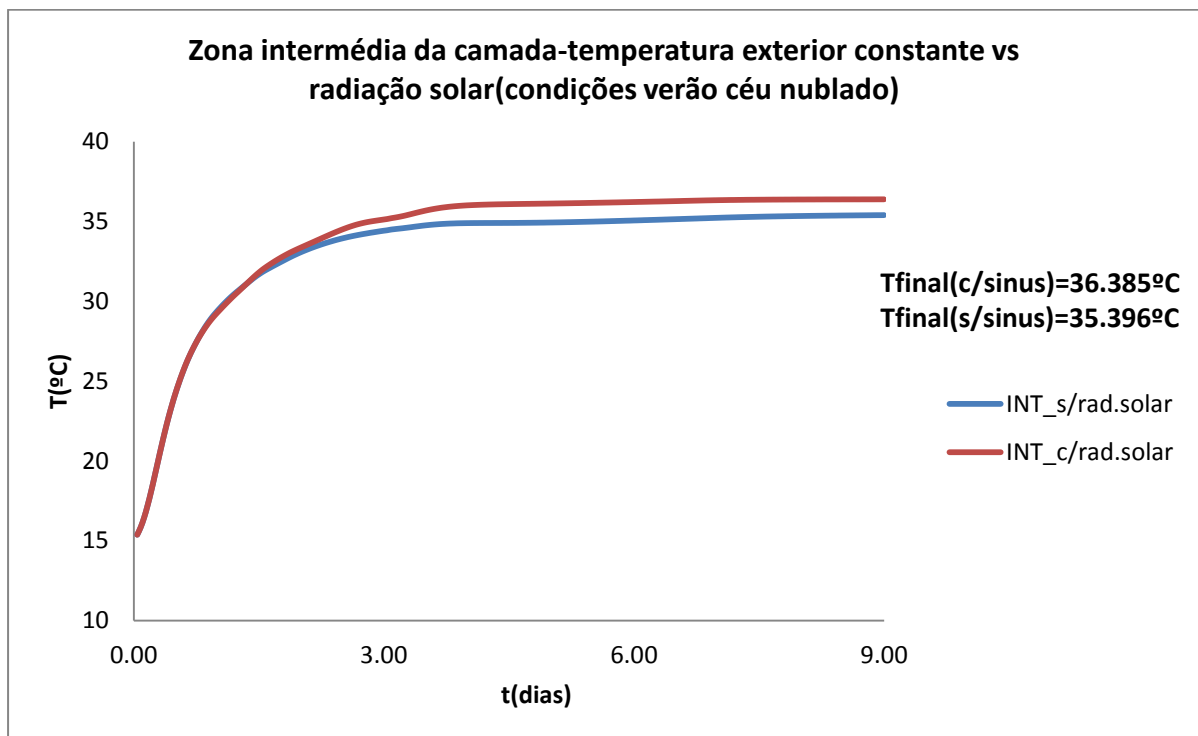


Fig.4.57- Comparação das zonas intermédias da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

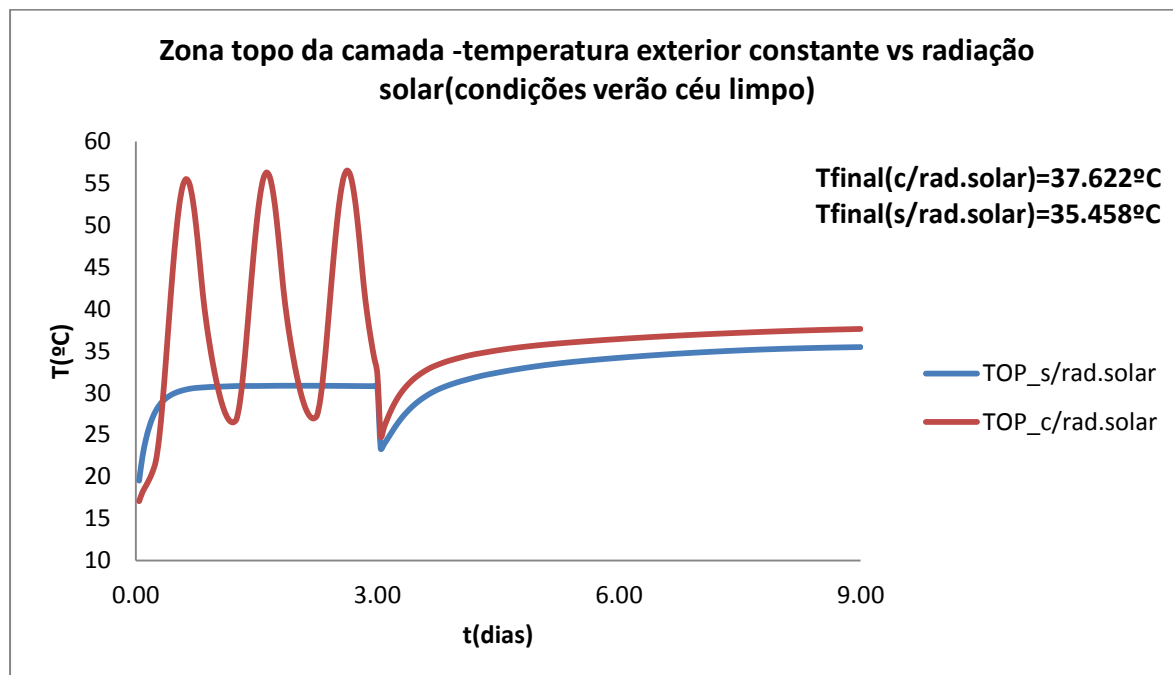


Fig.4.58- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

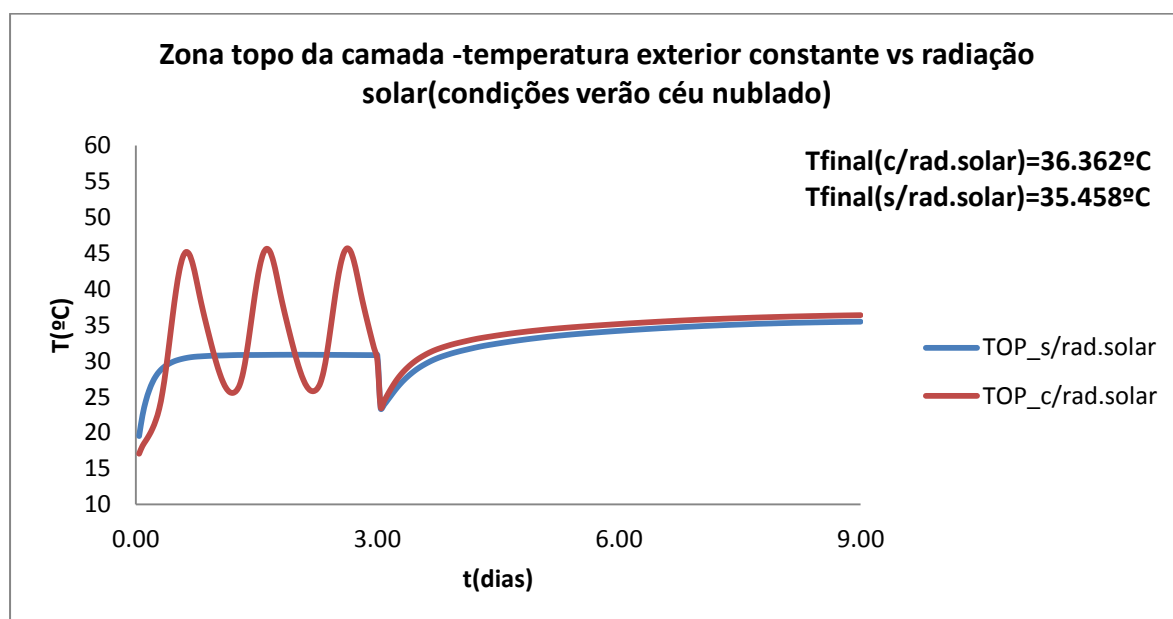


Fig.4.59- Comparação das zonas topo da camada considerando temperatura exterior constante e a radiação solar mais senoide.

Analisando agora as comparações feitas para a situação de verão, pode-se verificar que o comportamento não é idêntico a uma situação de inverno. Neste caso, o efeito da radiação solar já não é desprezável uma vez que nas camadas base e intermédia, a diferença de temperaturas já é de cerca de $2^{\circ}C$ para a situação de céu limpo e $1^{\circ}C$ para céu nublado. Também na zona topo pode-se constatar que nos primeiros três dias, aquando da sua exposição ao sol, atinge temperaturas por volta dos $55^{\circ}C$ e $45^{\circ}C$ para dias de céu limpo e nublado, respetivamente, algo que deve ser avaliado com especial cuidado aquando da análise posterior de tensões. Concluindo, visto que na situação de verão as temperaturas que se desenvolvem já são elevadas aquando a introdução

radiação solar, e sabendo da complexidade da modelação da radiação solar, seguidamente irá ser proposto um aumento ligeiro da temperatura média exterior para que a sua evolução se aproxime da situação da radiação solar. A temperatura exterior será aumentada até que a temperatura máxima calculada nas camadas de betão seja aproximadamente 1°C inferior a uma situação de céu limpo, situando-se ainda assim acima da correspondente a um dia de céu nublado. Esta opção é justificada pelo facto de que a consideração de uma temperatura máxima aproximadamente igual à de um dia de céu limpo seria demasiado conservativo, visto que no verão não existem apenas dias de céu limpo. Trata-se então de um processo iterativo segundo o qual só irá ser apresentado a iteração final que conduz à situação desejada.

Após algumas tentativas, verificou-se que, para a situação em que as temperaturas atingem aproximadamente 1°C à situação de radiação solar, é necessário subir a temperatura média exterior para 35°C. A evolução da temperatura fica então:

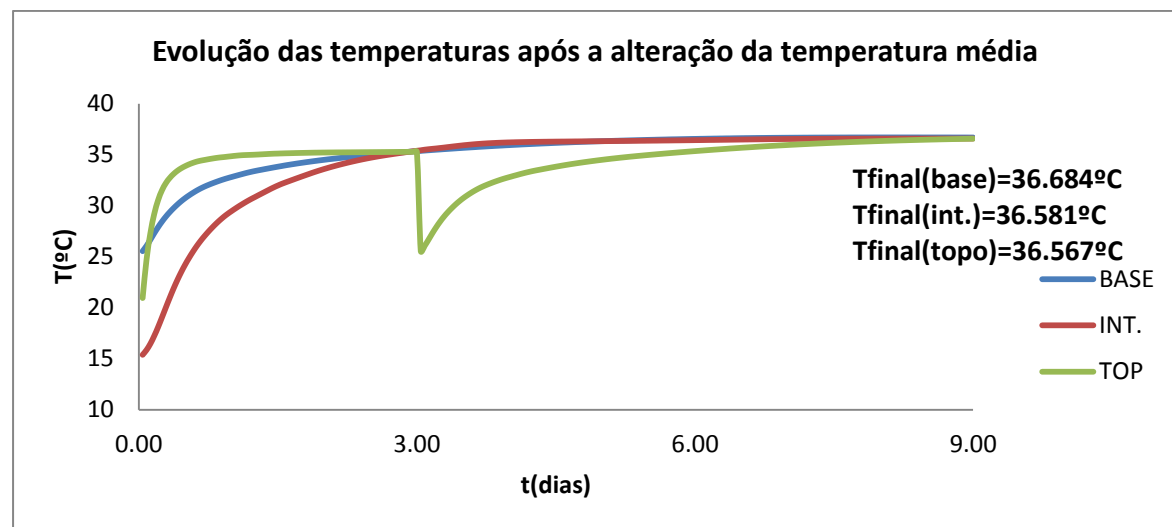


Fig.4.60- Evolução das temperaturas para uma nova temperatura média.

Fazendo a comparação entre as zonas base, intermédia e topo das camadas para esta solução e a solução com radiação solar com céu limpo:

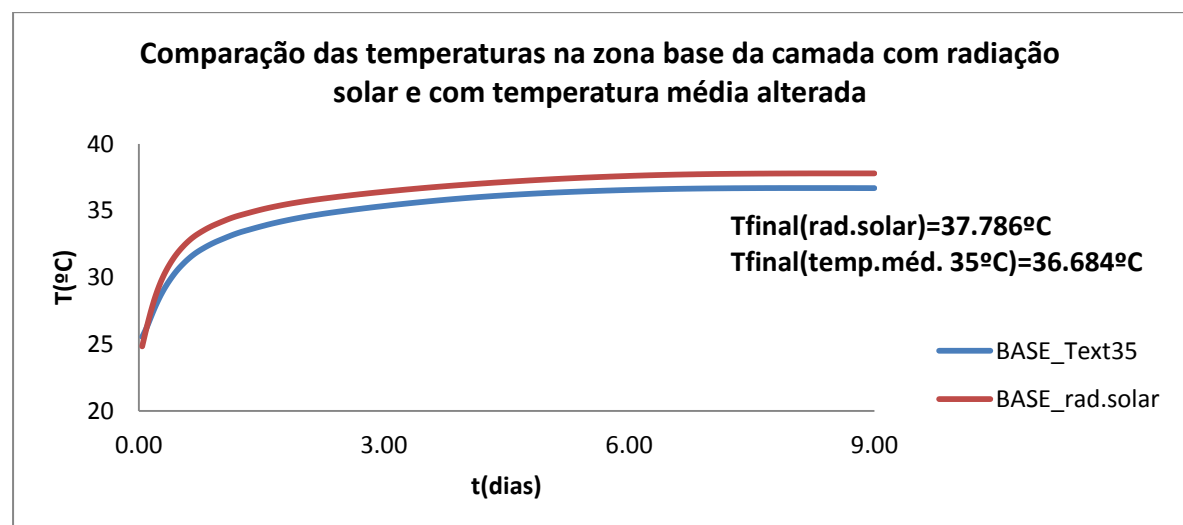


Fig.4.61- Comparação entre as temperaturas da zona base da camada para a situação com radiação solar e com a temperatura média alterada.

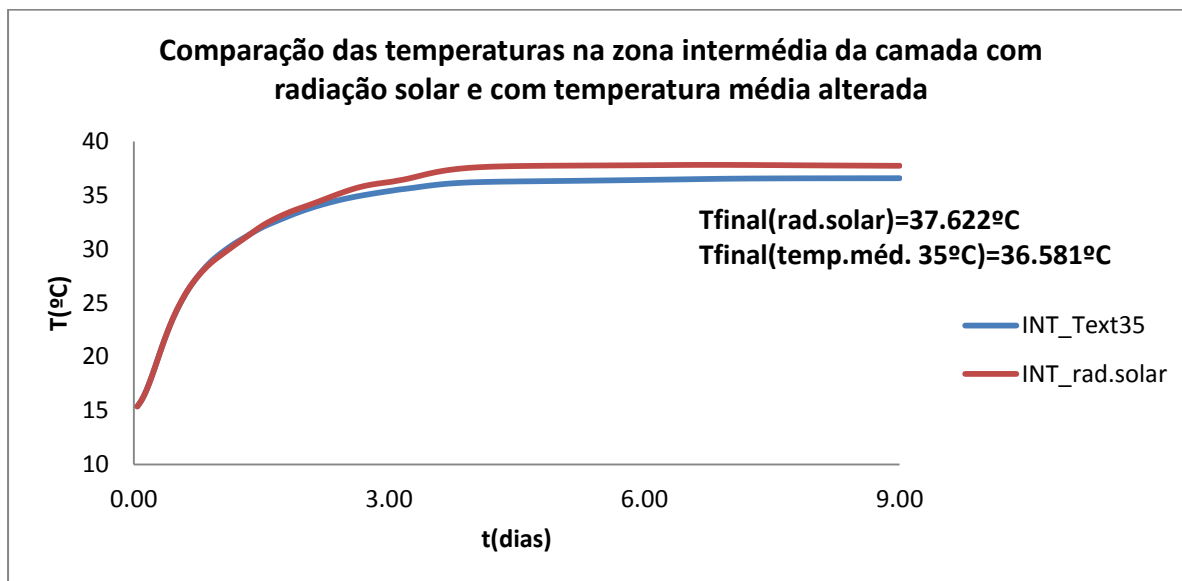


Fig.4.62- Comparação entre as temperaturas da zona intermédia da camada para a situação com radiação solar e com a temperatura média alterada.

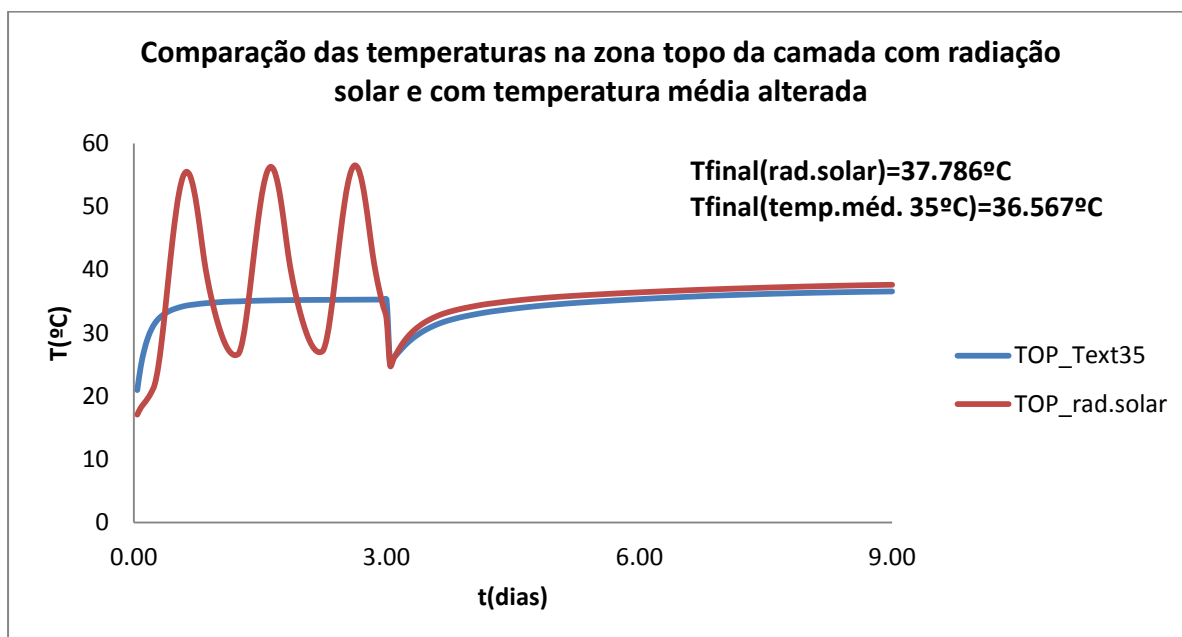


Fig.4.63- Comparação entre as temperaturas da zona topo da camada para a situação com radiação solar com a temperatura média alterada.

Pode-se verificar nas três zonas da camada que a temperatura atingida é sensivelmente 1°C inferior à solução com radiação solar para céu limpo, como desejado. No entanto, para os primeiros 3 dias na camada de topo, as temperaturas para a radiação solar continuam a ser bastante superiores, situação que deverá ser cuidadosamente analisada.

5

CASO DE ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

O presente caso de estudo refere-se a uma barragem do Aproveitamento Hidroelétrico de Ilisu que está a ser construída no Rio Tigre, Turquia, perto da fronteira com o Iraque e a Síria. Esta barragem tem como objetivo principal a produção de energia elétrica, mas também o controlo de cheias e armazenamento de água para rega. Esta zona apresenta um clima peculiar na medida em que as temperaturas ao longo do ano oscilam entre aproximadamente -5°C e 45°C . A sua temperatura média anual ronda à volta dos 18°C . Está-se assim perante um caso, a nível de clima, de condições extremas pelo que a definição do faseamento construtivo, tal como a escolha do tipo de betão a utilizar, irão ser fatores importantes para assegurar riscos de fendilhação reduzidos.

Na figura abaixo representa-se uma parte da planta do aproveitamento hidroelétrico sendo que a zona assinalada com uma elipse representa o bloco que irá ser objeto de análise.

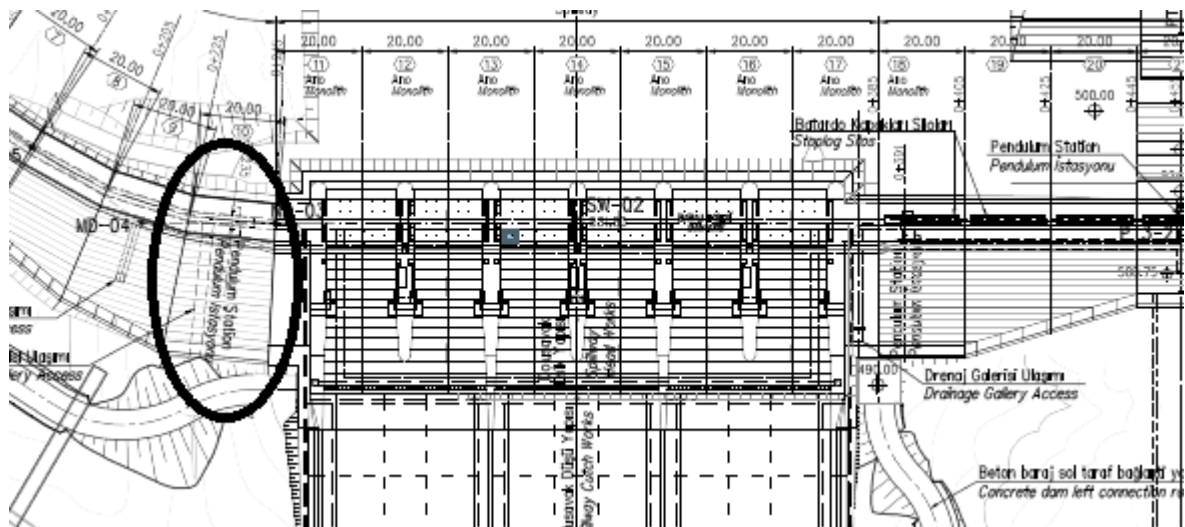


Fig.5.1- Parte da planta do aproveitamento hidroelétrico.

A barragem contém duas galerias sendo que uma delas se destina à drenagem (galeria inferior) e a outra é uma galeria técnica que assegura a passagem de cabos.

No subcapítulo seguinte é apresentado o modelo da barragem em que se dará foco a todos os pressupostos adotados para esta análise.

5.2. MODELO DA BARRAGEM

5.2.1. GEOMETRIA DA BARRAGEM

Na figura abaixo apresenta-se um corte transversal do bloco mais alto barragem:

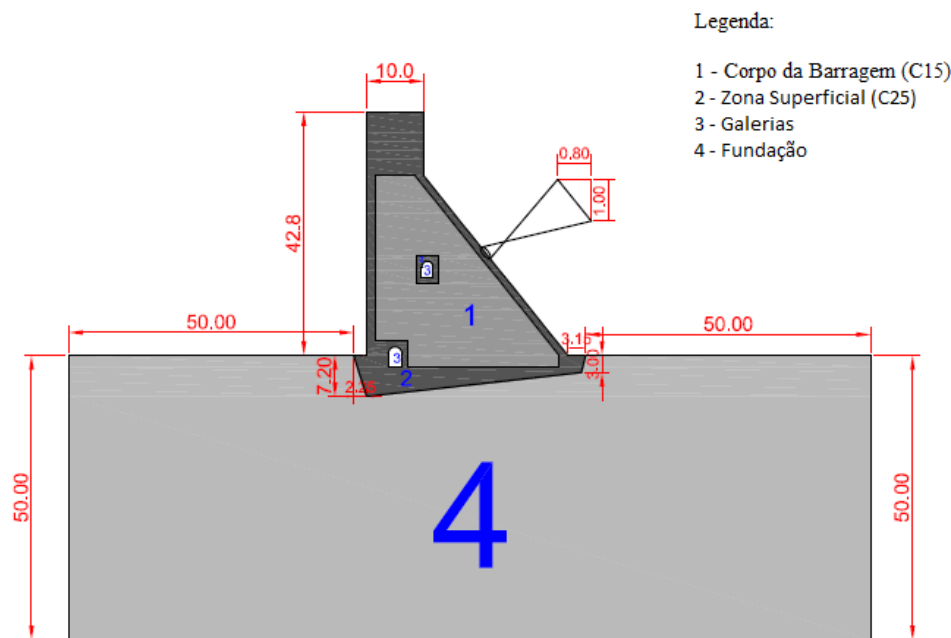


Fig.5.2- Secção transversal com a geometria do bloco analisado.

No que diz respeito às dosagens de cimento, para um C25 foi usado um cimento CEM II/A-M (P-LL) 42.5R com 270 Kg/m^3 misturada com uma quantidade de cinzas volantes de 90 Kg/m^3 perfazendo assim uma quantidade de ligante de 360 Kg/m^3 . No que diz respeito à resistência alvo aos 90 dias, o módulo de elasticidade é cerca de 35 GPa com uma resistência à tração média de 2.90 MPa .

Relativamente ao C15, trata-se de um betão com uma quantidade de cimento de 144 Kg/m^3 misturado com uma quantidade de cinzas volantes de 36 Kg/m^3 obtendo uma quantidade de ligante de 180 Kg/m^3 . Relativo ao módulo de elasticidade, o seu valor aos 90 dias é de 33 GPa com uma resistência à tração média de 2.10 MPa .

De forma a não sobrecarregar o desenho e visto que se tornaria impercetível a sua leitura, na figura seguinte apresenta-se a geometria das galerias:

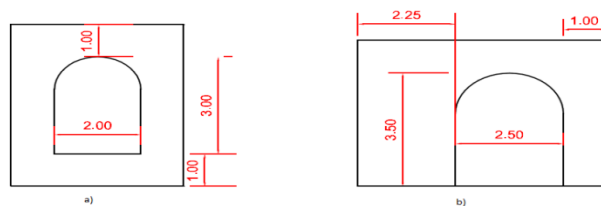


Fig.5.3- a) Galeria de cabos; b) Galeria de drenagem (dimensões em metros).

5.2.2. FASEAMENTO CONSTRUTIVO

A espessura das camadas de betonagem adotada para o corpo barragem foi de 2 metros. Na base e na zona do coroamento, em virtude de o betão ser mais rico em cimento, foram adotadas camadas com uma espessura de 1.50 metros. Uma pequena exceção na zona da galeria (no corpo da barragem) em que se apresenta uma camada de 1 metro de espessura e na zona da base da barragem com a mesma espessura. Por questões de geometria, a camada que liga a zona do corpo da barragem à zona do coroamento apresenta uma espessura de 0.55 metros. Também pela mesma razão, a última camada de coroamento apresenta uma espessura de 0.75 metros e a primeira camada da base da barragem de 1.20 metros de espessura. O tempo de espera entre cada camada foi de 3 dias.

Seguidamente, apresenta-se novamente uma figura da barragem mas desta vez com as camadas de betonagem:

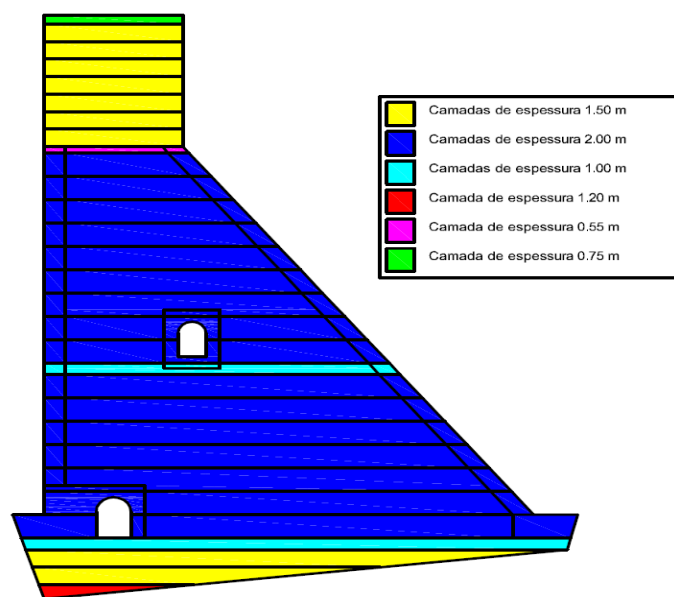


Fig.5.4- Camadas de betonagem da barragem.

5.2.3. TIPO DE ANÁLISE E MALHA USADA

O tipo de análise a efetuar neste estudo será em estado plano de deformação em que se admite que a direção z se encontra restringida e as suas extensões são impedidas. Desta forma as tensões e as temperaturas calculadas serão representativas da secção a meio do bloco, bloco este que tem 20m de largura entre juntas. Nesta análise, as tensões na direção x são consideradas representativas enquanto que as tensões na direção z estarão sobrestimadas devido ao tipo de análise que se adotou.

Na análise mecânica usou-se uma malha com elementos de 8 nós pertencentes à família Serendipity com 2×2 pontos de Gauss. Já para a análise térmica, foram usados elementos de 4 nós. Para definir as condições fronteira do problema, de forma a representar os fenómenos de convecção, foram usados elementos de 2 nós tal como no estudo paramétrico.

Dada a dificuldade da geração de malha em algumas zonas devido à sua geometria, usou-se no programa *DIANA* o algoritmo Delaunay tendo sido gerados elementos triangulares nessas zonas.

Seguidamente, apresenta-se a malha referente ao estudo termo - mecânico da barragem:

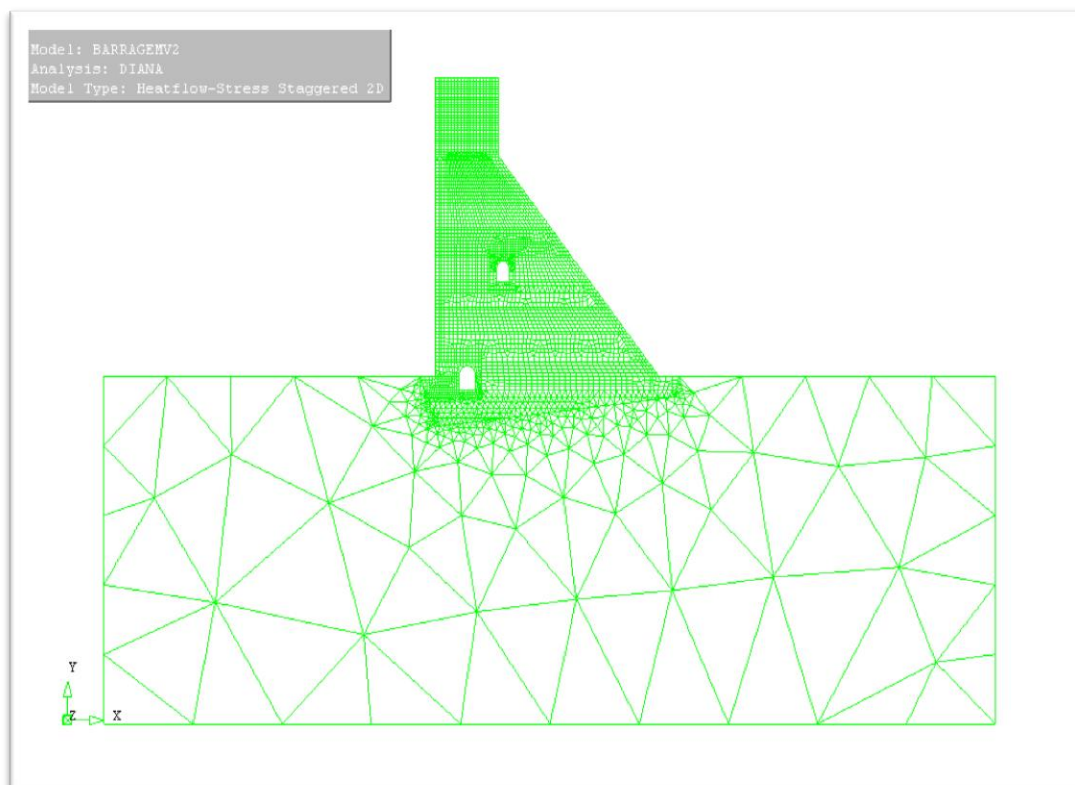


Fig.5.5- Malha de elementos finitos usada para o modelo termo - mecânico.

5.2.4. APOIOS

A definição dos apoios no modelo a fim de concretizar a análise mecânica é fulcral na medida de tentar traduzir de forma mais realista as restrições que na realidade existem e também com o objetivo de garantir o equilíbrio estático estrutural. Por conseguinte, foram colocados apoios duplos no contorno da fundação.

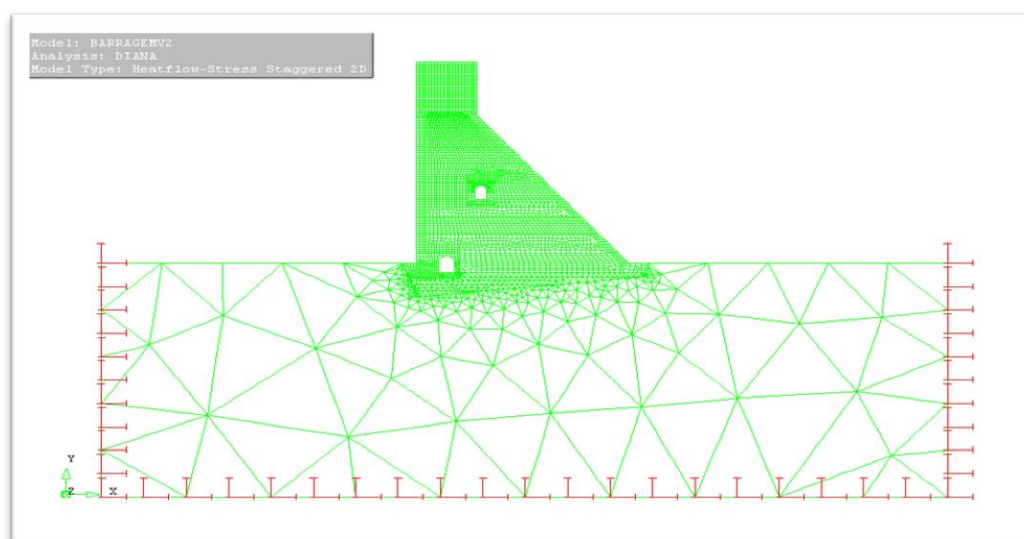


Fig.5.6- Apoios utilizados para a análise mecânica do modelo.

5.3. MATERIAIS

5.3.1. PROPRIEDADES EVOLUTIVAS DO BETÃO

Conforme referido em 5.2, o corpo da barragem é constituída pelo betão C15 e a camada superficial por um betão C25.

Tendo já sido referido no estudo paramétrico, o betão C15 betão é constituído por 180 Kg/m^3 de ligante possuindo 25% de cinzas volantes pelo que a respetiva curva adiabática se encontra representada na figura 4.1. Quanto ao betão C25, usou-se uma dosagem de ligante de 360 Kg/m^3 , com 25% de cinzas volantes.

A curva adiabática, obtida da mesma forma que a curva para o betão C25, é a seguinte:

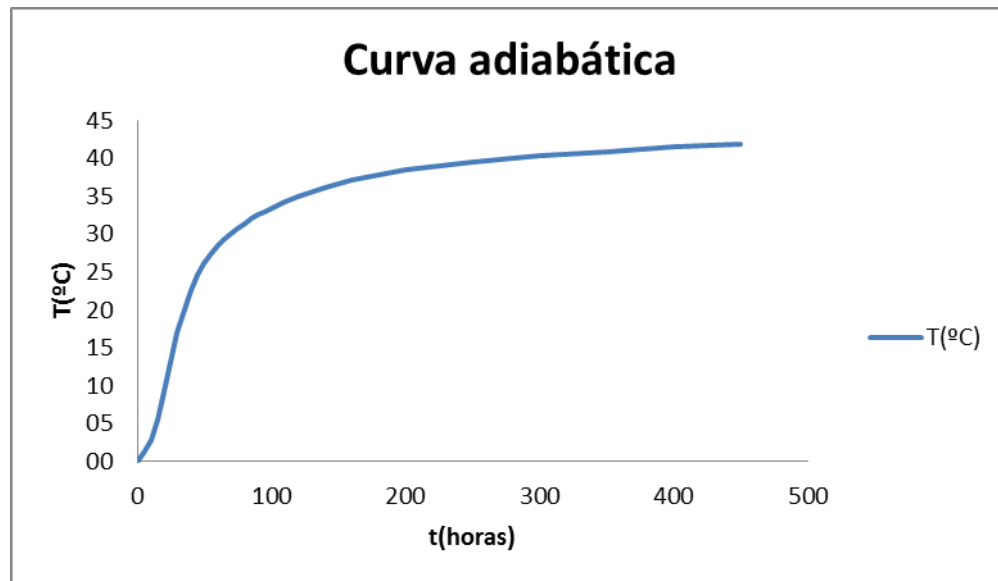


Fig.5.7- Curva adiabática correspondente ao betão C25.

5.3.1.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS

Como propriedades térmicas quer do betão C15 quer do betão C25:

Quadro5.1- Propriedades térmicas do betão.

Coeficiente de dilatação térmica	$\alpha_T = 12 \times 10^{-6}$
Condutibilidade térmica	$k = 2.1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Peso volúmico	$\rho = 2470 \text{ Kg/m}^3$
Calor específico	$c = 0.87 \text{ KJ.Kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$
Difusibilidade térmica	$h = 0.0035 \text{ m}^2.\text{h}^{-1}$
Calor específico volumétrico	$c\rho = 2160 \text{ KJ.m}^{-3}.\text{C}^{-1}$

No que respeita as condições fronteira, foi usado um valor para $h_{c,r}$ de $21.6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ em que o seu cálculo é o mesmo que o usado nos estudos paramétricos em 4.2.8.

5.3.1.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

De seguida, apresenta-se dois quadros, um para as propriedades mecânicas do betão C25 e outro para o C15 aos 28 dias, respetivamente:

Quadro5.2- Propriedades mecânicas aos 28 dias usadas para o betão C25.

Módulo de elasticidade	$E_{cm}=31 \text{ GPa}$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.20$
Resistência à tração média	$f_{ctm}=2.6 \text{ MPa}$

Quadro5.3- Propriedades mecânicas aos 28 dias usadas para o betão C15.

Módulo de elasticidade	$E_{cm}=29 \text{ GPa}$
Coefficiente de Poisson	$\nu=0.20$
Resistência à tração média	$f_{ctm}=2.2 \text{ MPa}$

Usando agora as expressões (2.44) e (2.45) para exprimir a resistência a tração e o módulo de elasticidade em que $t_0=0.125$ dias (3 horas) e $s=0.38$ (devido à percentagem de cinzas existente), temos que a evolução é a seguinte:

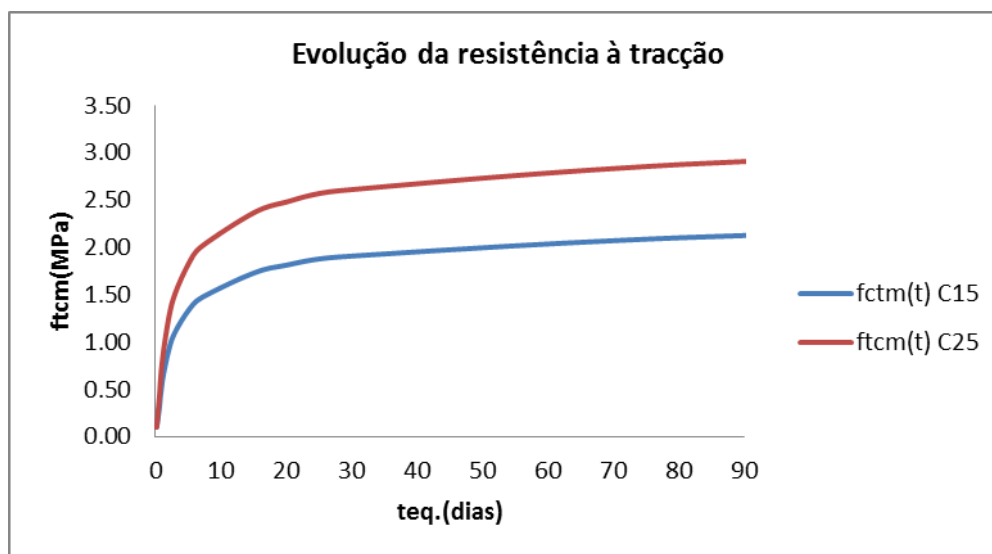


Fig.5.8- Evolução da resistência à tração do betão.

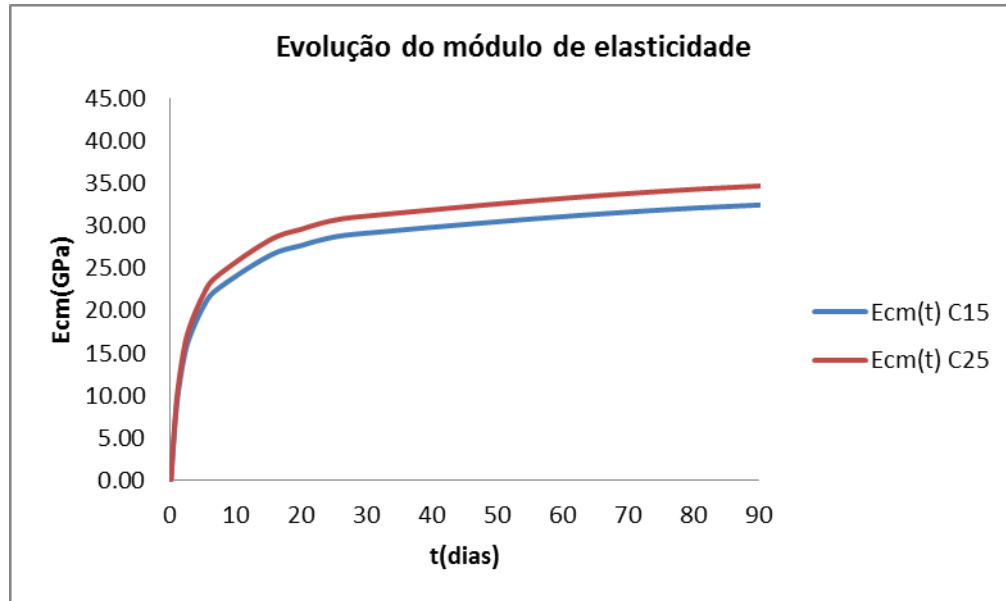


Fig.5.9- Evolução do módulo de elasticidade.

5.3.2. FLUÊNCIA

A fluência foi introduzida recorrendo á lei da dupla potência sendo que foram utilizados parâmetros de um betão C16/20(Azenha, M.Â.D., 2009) para o corpo da barragem. Para a zona da superfície e coroamento da barragem, foram introduzidos, inicialmente, os mesmos parâmetros do corpo da barragem e posteriormente utilizaram-se outros parâmetros correspondentes a um betão C25/30(Azenha, M. and Faria, R., 2008).

Quadro5.4- Parâmetros usados para a barragem.

	n	m	ϕ_I	t_d
Corpo da Barragem	0.3	0.2	0.2246	$3.89 \times 10^6 \text{s}$
Zona superficial e coroamento	0.21	0.2	0.65	$3.89 \times 10^6 \text{s}$

5.3.3. RETRAÇÃO

No que respeita à retração, foram definidos dois tipos de retração no capítulo 2. Uma vez que a retração autógena é apenas significativa para betões de alto desempenho, e visto este betão ser um betão de resistência normal, este efeito será desprezado. No que respeita à retração de secagem, uma vez o curto tempo de análise em causa, este efeito também irá ser desprezado.

5.3.4. FUNDAÇÃO

Tendo sido necessário a definição da fundação, com a geometria acima definida e como forma de garantir a dissipação de calor da barragem, foram também usadas propriedades térmicas e mecânicas, mas sem qualquer carácter evolutivo. Sendo assim, no quadro abaixo, apresentam-se as propriedades térmicas e mecânicas adotadas.

Quadro5.5- Propriedades adotadas para a fundação.

Condutibilidade térmica	$k=2.1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Calor específico volumétrico	$c_p=2160 \text{ KJ.m}^{-3}.\text{C}^{-1}$
Coeficiente de dilatação térmica	$\alpha_T=12 \times 10^{-6}$
Peso volúmico	$\rho=2600 \text{ Kg.m}^{-3}$
Módulo de elasticidade	$E=5\text{GPa}$
Coeficiente de Poisson	$\nu=0.3$

5.4. ACÇÕES

5.4.1. TEMPERATURA INTERIOR E EXTERIOR

Como foi verificado com os estudos paramétricos, a temperatura de colocação do betão é o um dos fatores que mais influência a evolução das temperaturas.

Sendo assim, estipulou-se que a temperatura de colocação do betão fresco não deve exceder os 15°C durante os meses de maio a Setembro e os 10°C nos restantes meses.

Estes valores são relativamente baixos e irão ser bastante exigentes no que respeita ao pré-arrefecimento do betão.

No que diz respeito à temperatura exterior do ar, foi tido conta a expressão definida em 4.2.9.

Os parâmetros para a obtenção da curva de temperaturas anual foram:

Quadro5.6- Parâmetros usados para a curva de temperaturas anual.

T_M	17.8°C
A	13.0
w	0.0172
t_{IM}	115 dias
$T_{m\acute{a}x}$	30.7°C
T_{min}	4.95°C

No entanto, estes parâmetros não têm em conta o efeito da radiação solar visto a sua complexidade no que toca a modelação, como foi referido no capítulo anterior. Para tal, de forma a ter em conta este efeito, procedeu-se a uma alteração da temperatura máxima que atinge na altura do verão (visto que a influência da radiação solar é mais visível nessa época) de cinco graus tal como foi feito no estudo paramétrico. Logo, os novos parâmetros a ter em conta são:

Quadro5.7- Novos parâmetros a ter em conta após a consideração do efeito da radiação solar.

T_M	20.2°C
A	15.0
w	0.0172
t_{IM}	115 dias
$T_{m\acute{a}x}$	35.0°C
T_{min}	4.95°C

Representando assim as evoluções das temperaturas ao longo do ano:

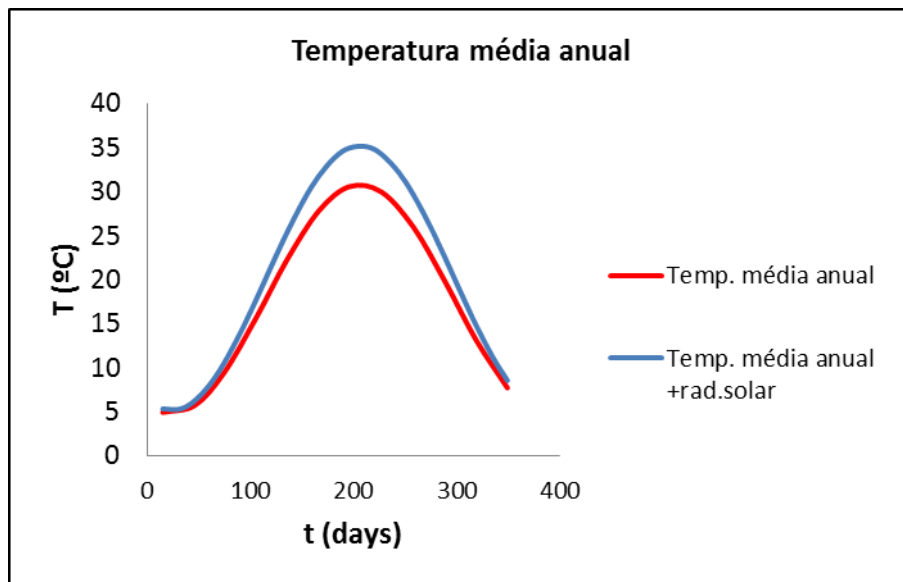


Fig.5.10- Evolução das temperaturas ao longo do ano.

5.4.2. GRAVIDADE

Na necessidade de efetuar uma análise mecânica, definiu-se como ação a gravidade que tem como valor $g=9.81 \text{ m.s}^{-2}$.

5.5. RESULTADOS DA ANÁLISE TERMO-MECÂNICA DO MODELO

Apresentadas as condições do modelo no que diz respeito à sua geometria, camadas de betonagem, malha, condições fronteira, materiais, propriedades térmicas e mecânicas e ações, procede-se agora à sua análise.

Neste estudo, foram consideradas três zonas de análise, uma referente à zona da base da barragem, outra referente ao núcleo da barragem e outra à zona do coroamento.

Foram também considerados vários cenários de forma a poder ser feita uma comparação sobre a evolução das temperaturas e tensões desenvolvidas. Os três principais cenários considerados correspondem a três estações do ano, o inverno, a primavera e o outono. Todas estas análises apenas vão cobrir, a nível de tempo de análise, a fase construtiva.

Nestas análises, apenas vão ser analisadas as tensões na direção x e z. As tensões na direção y não geram grandes preocupações a nível das trações devido ao peso próprio da barragem.

A apresentação dos mapas de tensões na direção x e z, bem como os mapas das temperaturas para as três zonas encontram-se representados nos anexos.

5.5.1. ZONA DA BASE DA BARRAGEM

Para a zona da base da barragem, perto da fundação, foram considerados 4 cenários de forma a avaliar as evoluções das temperaturas e das tensões:

- **1º CENÁRIO:** Início da betonagem em Janeiro.
- **2º CENÁRIO:** Início da betonagem em Abril
- **3º CENÁRIO:** Início da betonagem em Julho
- **4º CENÁRIO:** Início da betonagem em Outubro

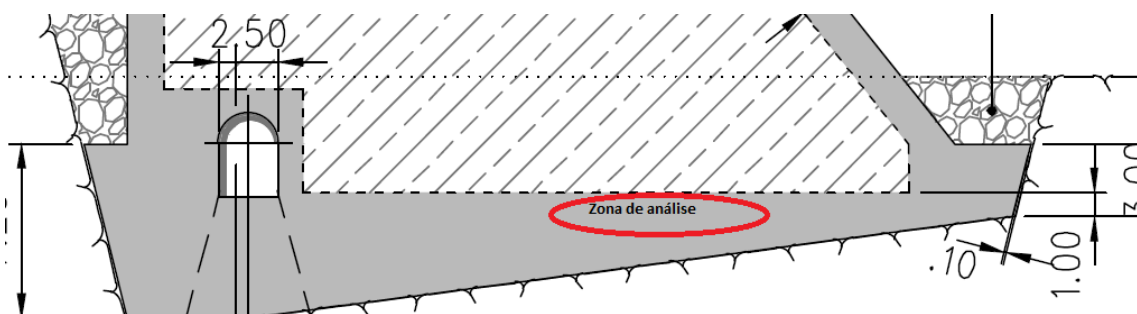


Fig.5.11- Zona de análise da base da barragem.

Apresentados os cenários, segue-se agora à apresentação dos gráficos referentes a cada um dos cenários.

1º CENÁRIO:

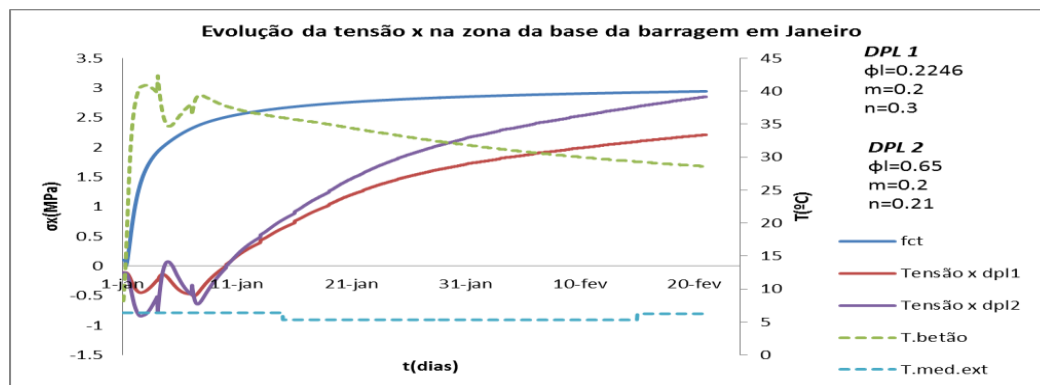


Fig.5.12- Evolução da temperatura e de σ_x .

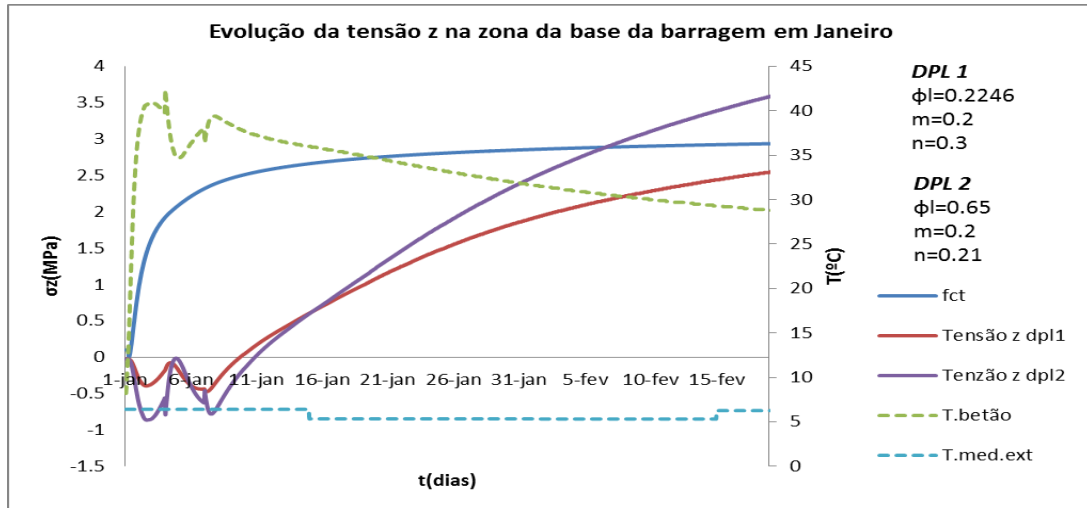


Fig.5.13- Evolução da temperatura e de σ_z .

2º CENÁRIO:

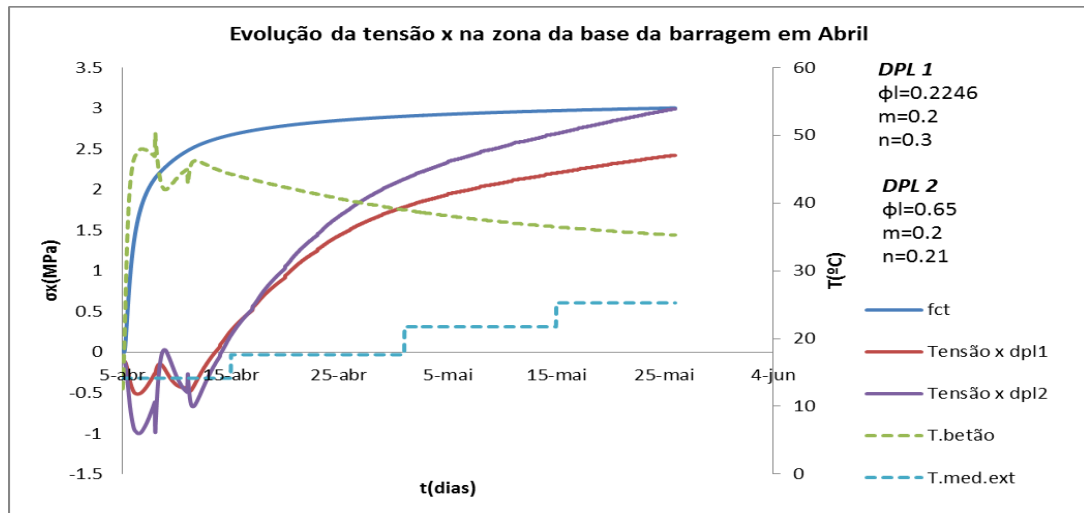


Fig.5.14- Evolução da temperatura e de σ_x

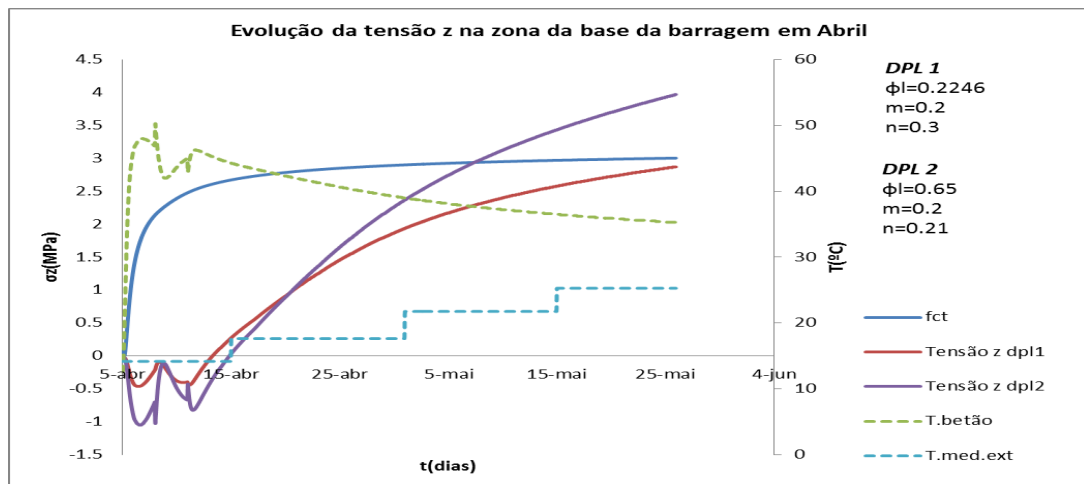


Fig.5.15- Evolução da temperatura e de σ_z .

3º CENÁRIO:

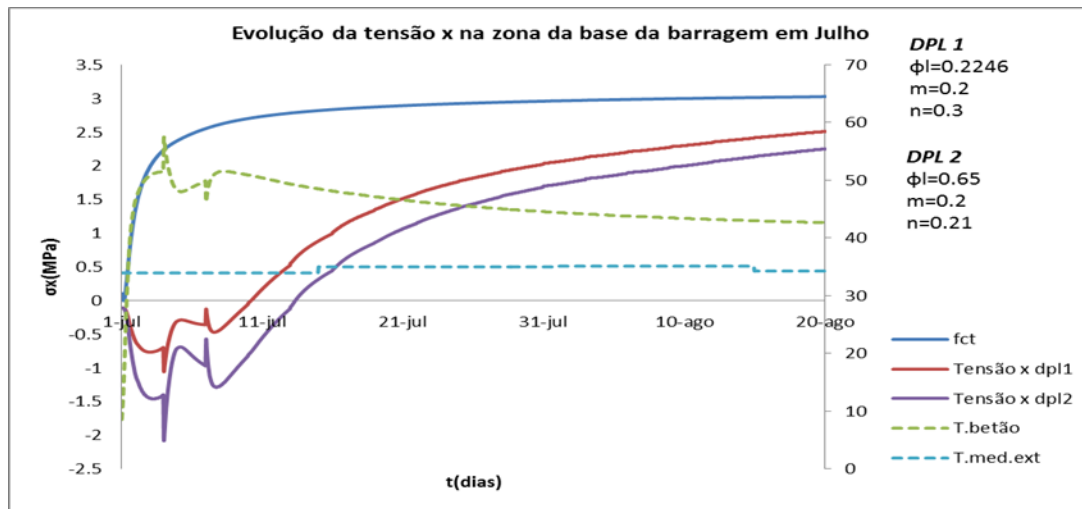


Fig.5.16- Evolução da temperatura e de σ_x .

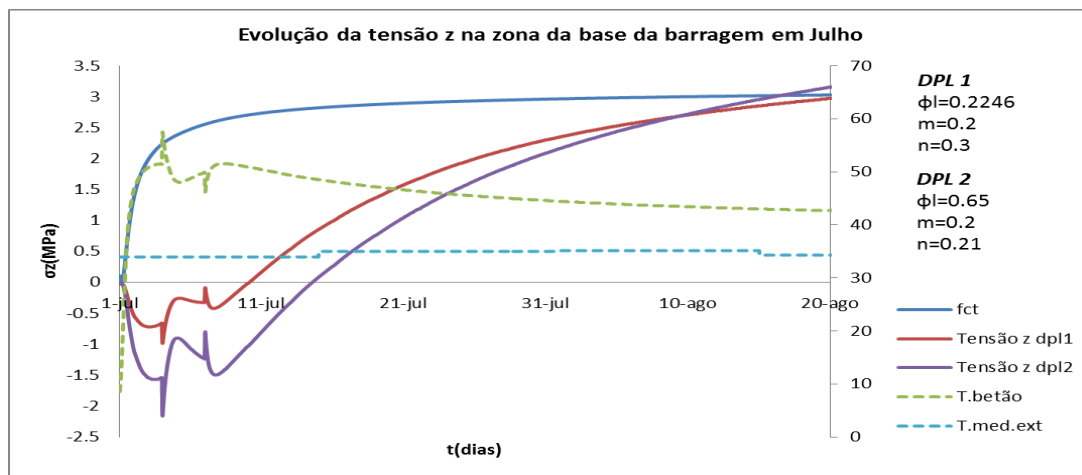


Fig.5.17- Evolução da temperatura e de σ_z .

4º CENÁRIO

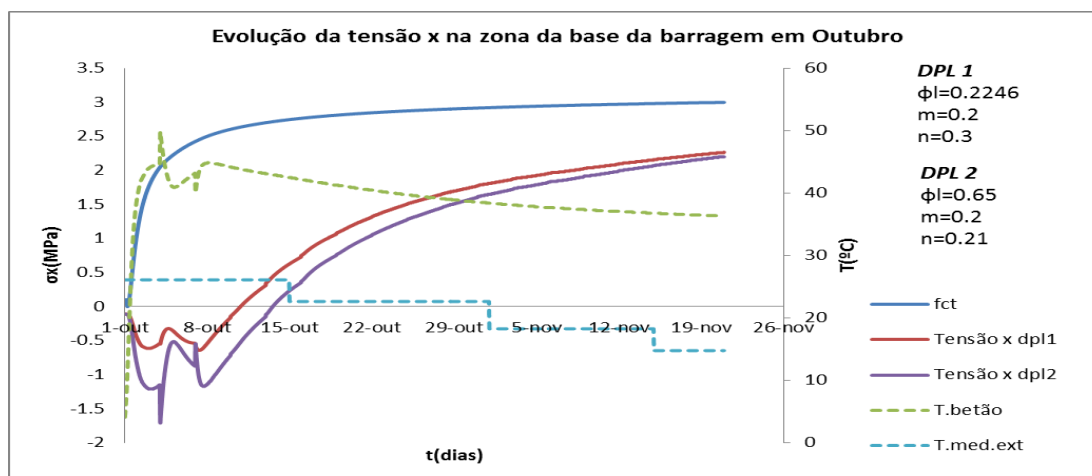
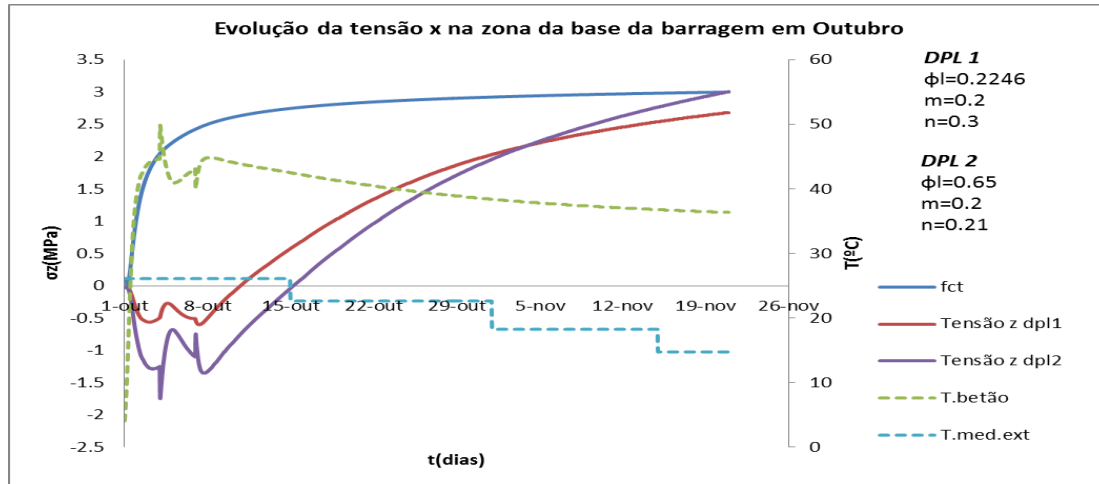


Fig.5.18- Evolução da temperatura e de σ_x .

Fig.5.19- Evolução da temperatura e de σ_z .

Fazendo agora uma análise perante estes quatro cenários, verifica-se que o risco de fendilhação é elevado nas duas direções sendo que na direção z ocorre fendilhação, uma vez que o valor do f_{ctm} é ultrapassado. No entanto, como se referiu, as tensões em z estão sobrestimadas.

Apesar das tensões estarem sobrestimadas, é evidenciado que a fendilhação não é imediata ocorrendo pois, na pior situação num prazo de aproximadamente um mês. Tal situação ocorre uma vez que a betonagem das camadas posteriores impede que o decréscimo de temperatura seja tão acentuado o que permite que nos primeiros dias o betão esteja comprimido. Caso houvesse uma paragem de betonagem prolongada (no caso de ocorrer problemas de segurança no trabalho por exemplo) esta fendilhação seria mais prematura uma vez que como o betão iria estar em contacto com a temperatura exterior e os gradientes térmicos seriam muito mais fortes. Estas simulações das evoluções das tensões nestas condições encontram-se dispostas nos anexos.

Uma vez ocorrida esta fendilhação, como solução poder-se-ia esperar que o betão endurecesse o suficiente para se proceder à injeção de resina epóxi de forma a restituir a estanquidade, a resistência e o monolitismo da estrutura de betão.

5.5.2.ZONA DO NÚCLEO DA BARRAGEM

Apresentada a zona da base da barragem e tiradas as respetivas conclusões, segue-se agora à análise do núcleo da barragem. Estes resultados foram retirados de um elemento representativo no meio de uma camada central do núcleo da barragem.

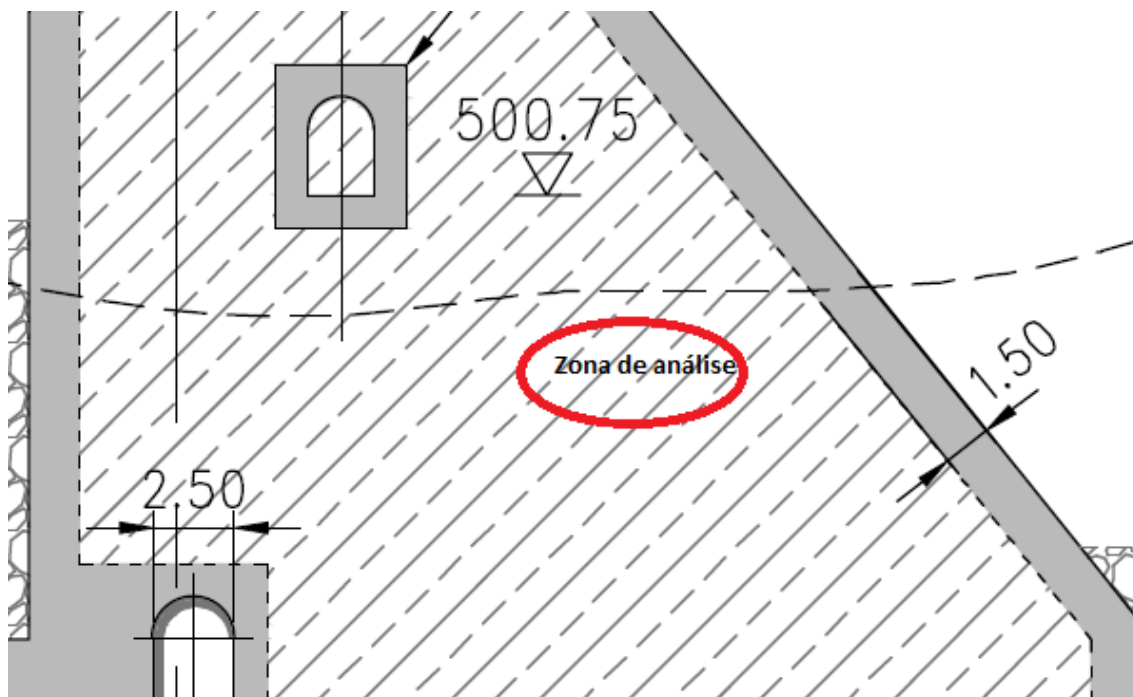


Fig.5.20- Zona de análise do núcleo.

Tal como na zona da base da barragem, nesta zona do núcleo foram apresentados cenários distintos, cada um correspondente a uma altura diferente do ano de betonagem. Assim sendo, os cenários são:

- **1ª CENÁRIO:** Início da betonagem em finais de Janeiro
- **2ª CENÁRIO:** Início da betonagem em finais de Abril
- **3ª CENÁRIO:** Início da betonagem em finais de Outubro

As evoluções das temperaturas e das tensões são as seguintes:

1ª CENÁRIO

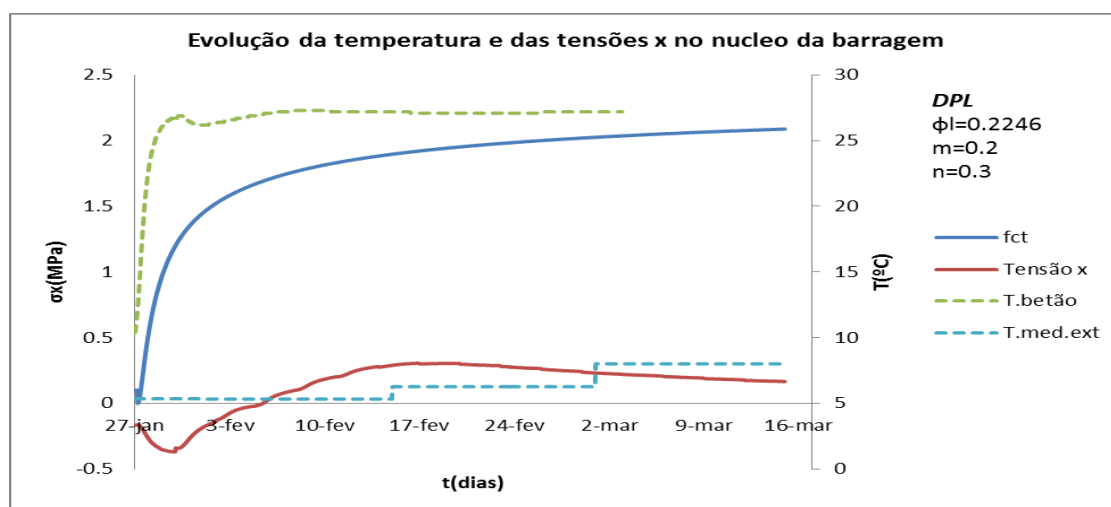


Fig.5.21- Evolução da temperatura e de σ_x .

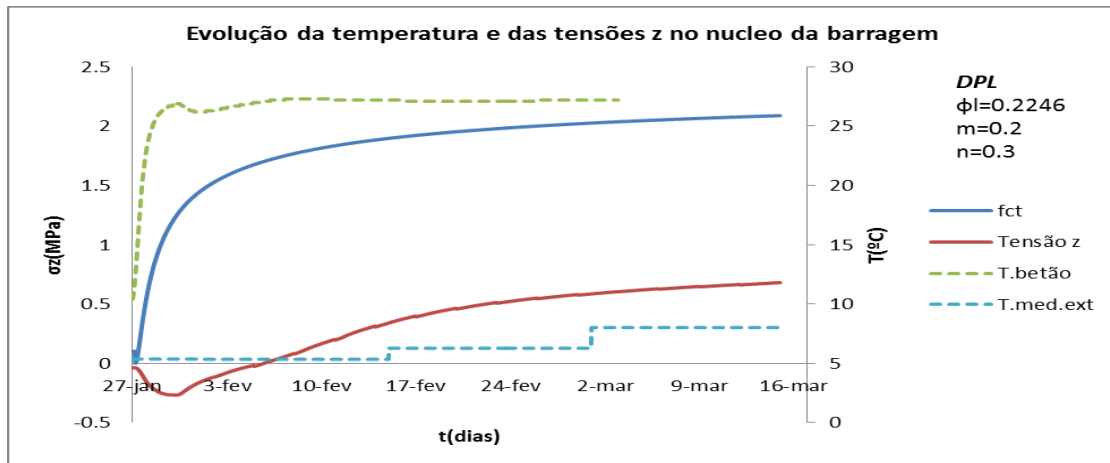


Fig.5.22- Evolução da temperatura e de σ_z .

2º CENÁRIO

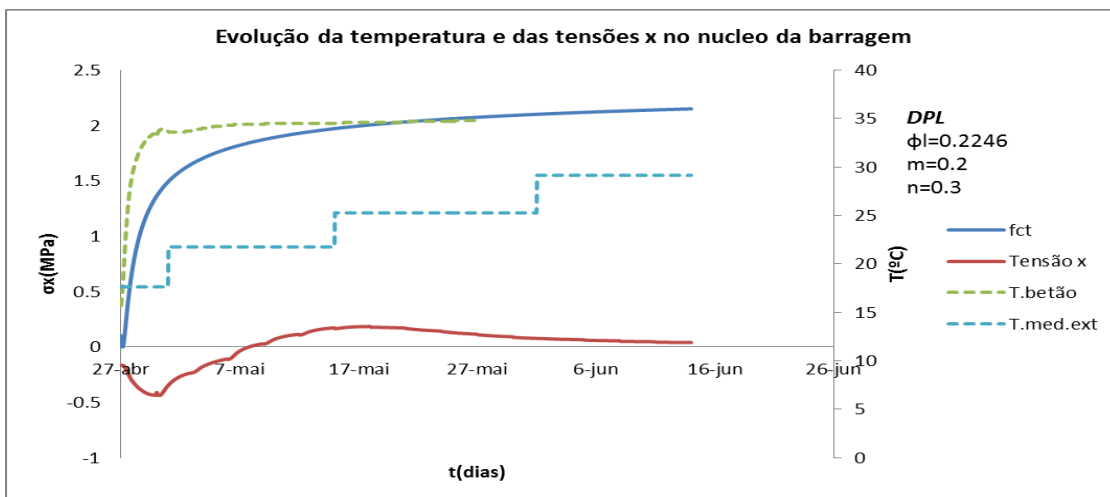


Fig.5.23- Evolução da temperatura e de σ_x .

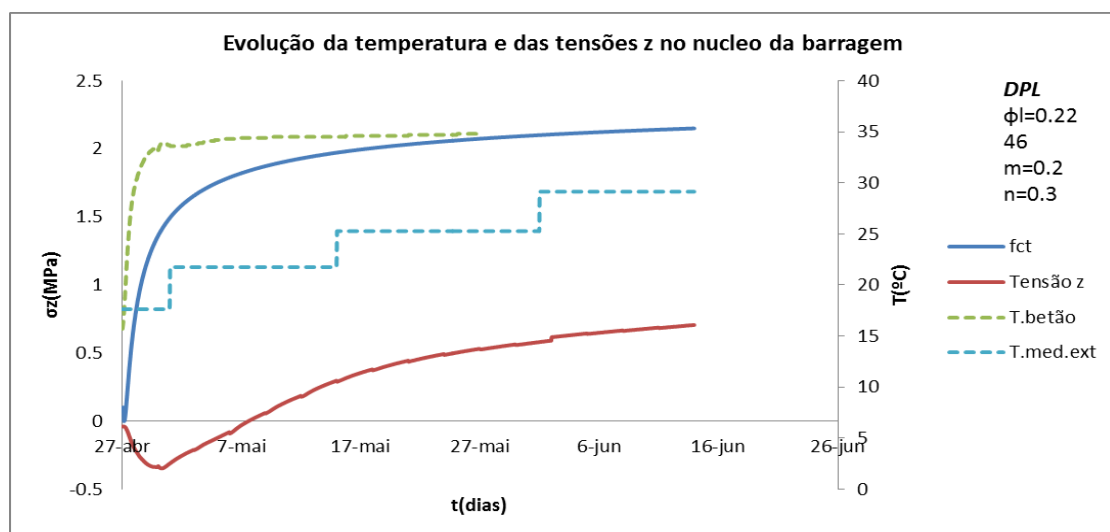
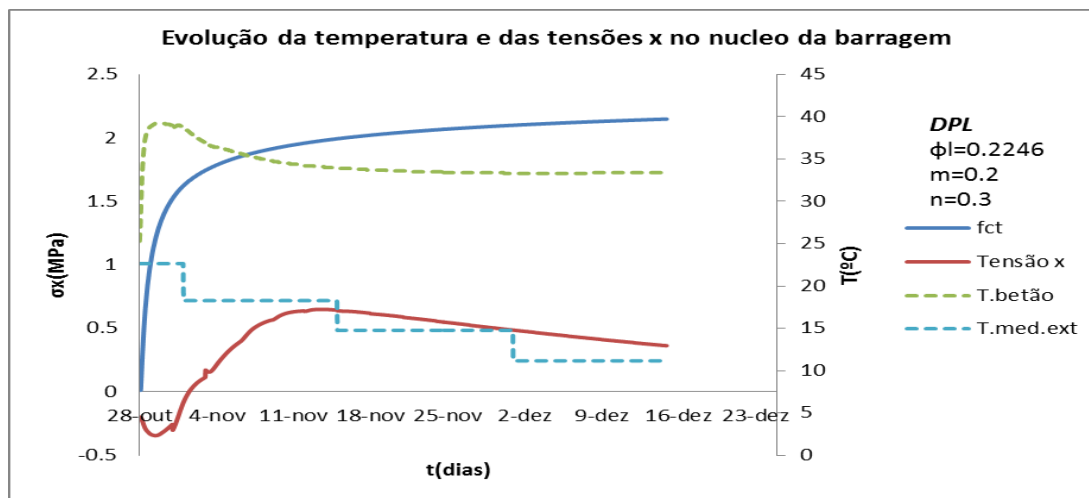
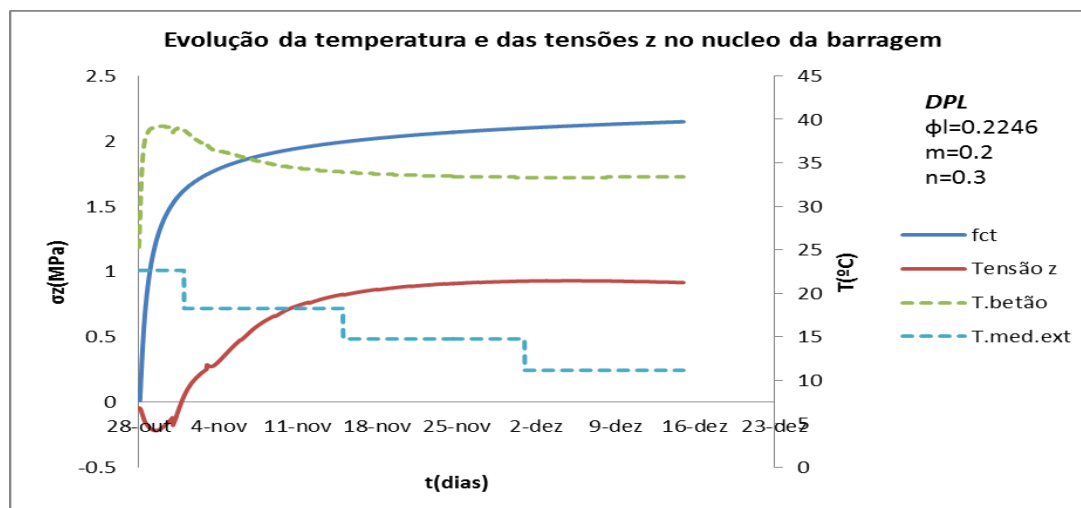


Fig.5.24- Evolução da temperatura e de σ_z .

3º CENÁRIO

Fig.5.25- Evolução da temperatura e de σ_x .Fig.5.26- Evolução da temperatura e de σ_z .

Avaliando agora os efeitos das tensões em x e em z no núcleo da barragem, é possível verificar que o risco de fendilhação durante a fase construtiva é praticamente nulo. Observa-se que na direção x as tensões atingem um pico ao fim de sensivelmente dez/quinze dias e voltam a decrescer estando entre valores dos 0 aos 0.5 MPa. Já na direção z, verifica-se que as tensões estão constantemente a aumentar. No entanto, este modelo em estado plano de deformação sobrestima o grau de restrição na direção perpendicular ao plano e os valores de σ_z são apenas indicativos.

No entanto, esta análise só está representada para um espaço de tempo de dois meses (durante o faseamento construtivo) o sendo inconclusiva quanto ao risco de fendilhação do núcleo da barragem a longo prazo, na medida em que o abaixamento da temperatura até atingir a temperatura média anual do local (cerca de 18°C) é um processo lento que pode levar anos a ocorrer.

5.5.3. ZONA DO COROAMENTO DA BARRAGEM

A zona de coroamento da barragem apresenta a mesma quantidade de cimento do betão adotado na fundação, pelo que o risco de fendilhação pode também estar presente. Assim sendo, fez-se uma análise a um elemento no interior do coroamento e ao elemento que representa a superfície da última camada que irá estar em contacto permanente com a temperatura exterior.

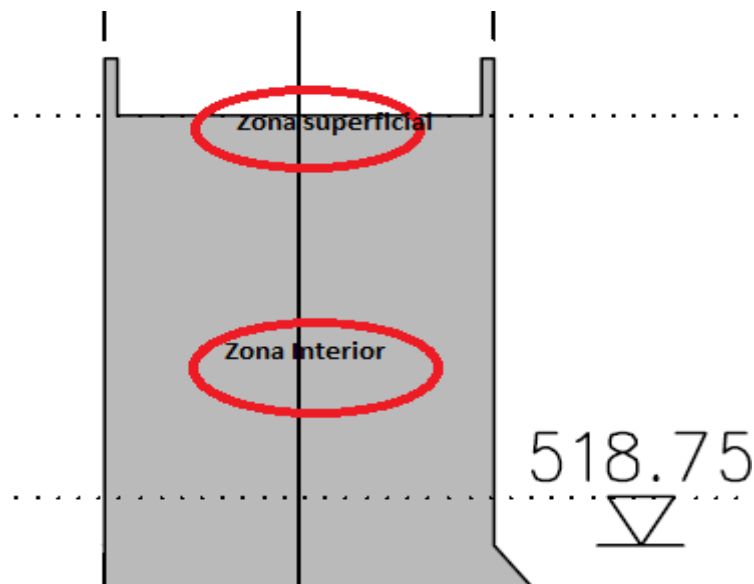


Fig.5.27- Zonas de análise no coroamento.

Os cenários adotados foram:

- **1º CENÁRIO:** - Zona interior: Início da betonagem em Março.
- Zona superficial: Início da betonagem no final de Março.
- **2º CENÁRIO:** - Zona interior: Início da betonagem em Abril
- Zona superficial: Início da betonagem no final de Abril
- **3º CENÁRIO:** - Zona interior: Início da betonagem em Junho
- Zona superficial: Início da betonagem no final de Junho
- **4º CENÁRIO:** - Zona interior: Início da betonagem em Janeiro
- Zona superficial: Início da betonagem no final de Janeiro

Pelo que as respectivas evoluções das temperaturas e tensões são:

1ª CENÁRIO: Zona interior

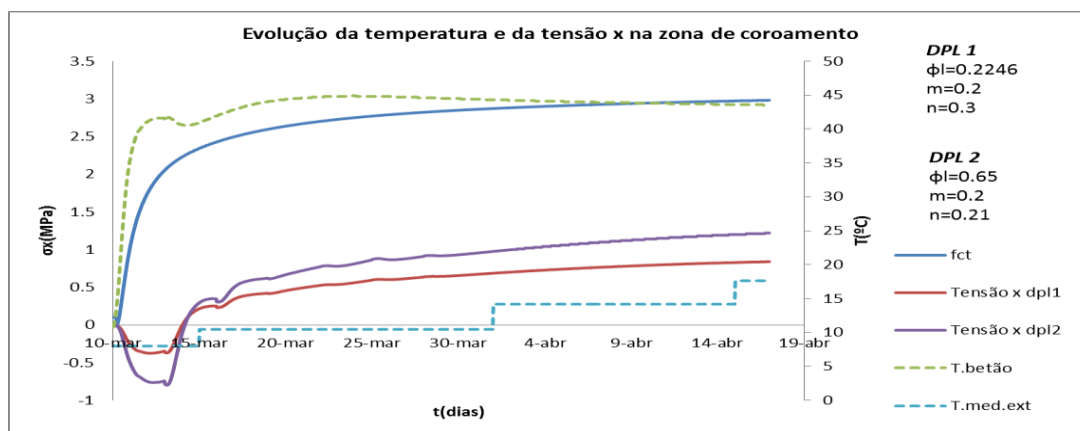


Fig.5.28- Evolução da temperatura e de σ_x .

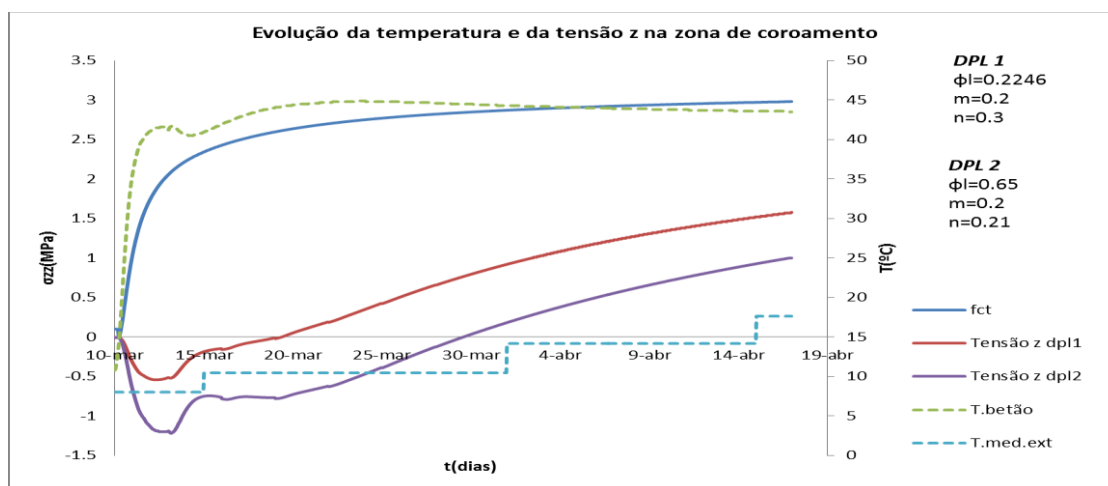


Fig.5.29- Evolução da temperatura e de σ_z .

2ª CENÁRIO: Zona interior

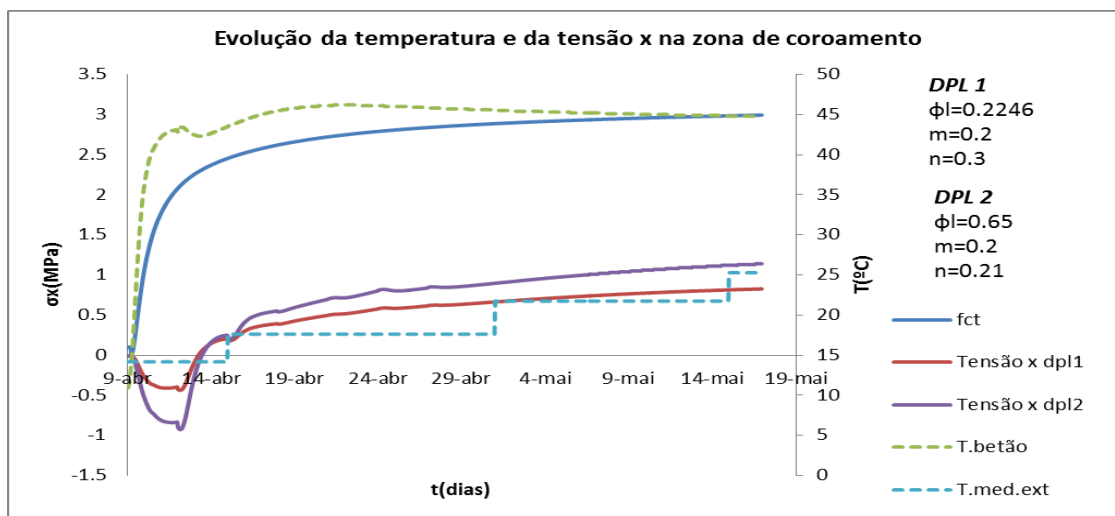


Fig.5.30- Evolução da temperatura e de σ_x .

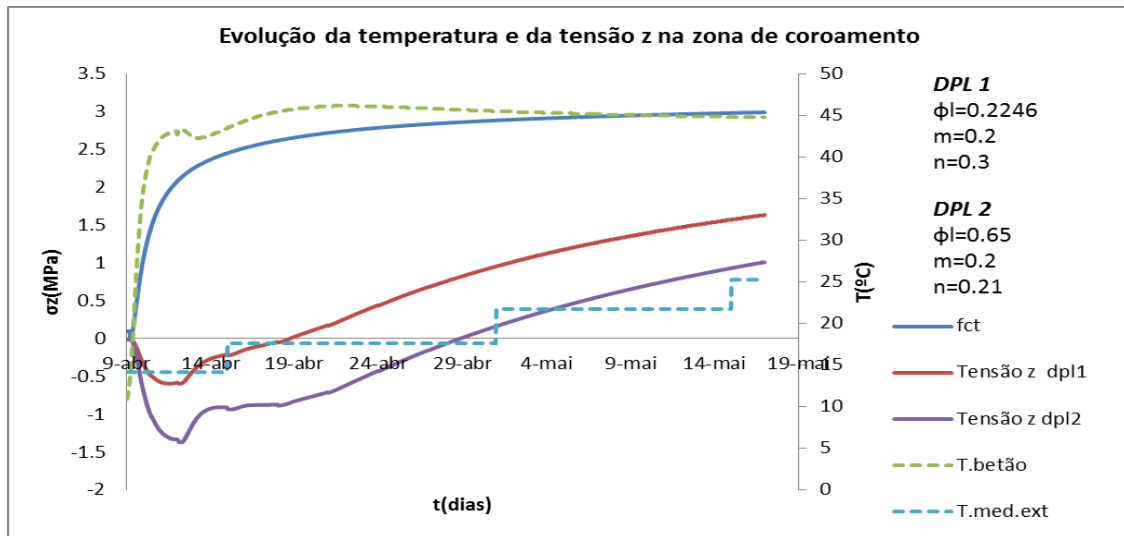


Fig.5.31- Evolução da temperatura e de σ_z .

3º CENÁRIO: Zona interior

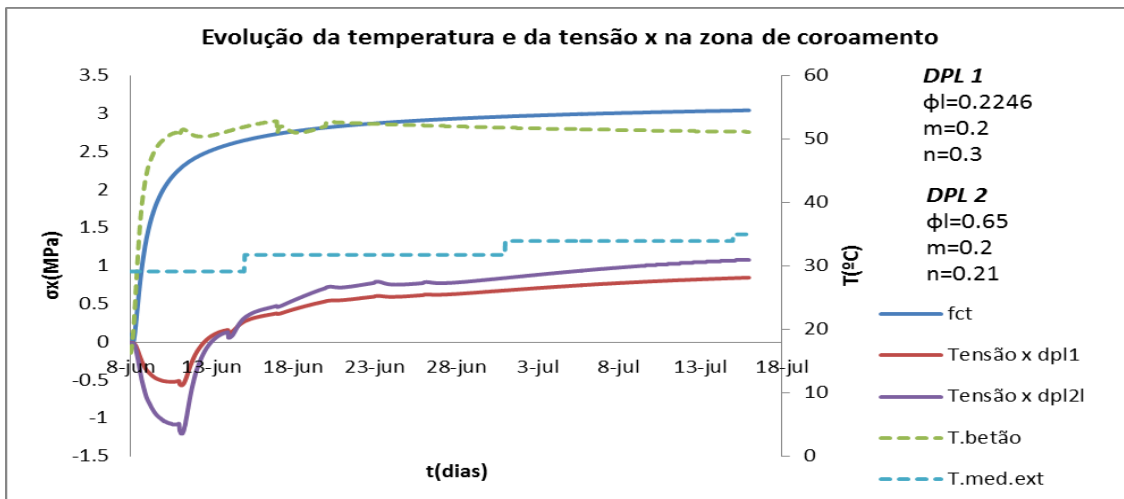


Fig.5.32- Evolução da temperatura e de σ_x .

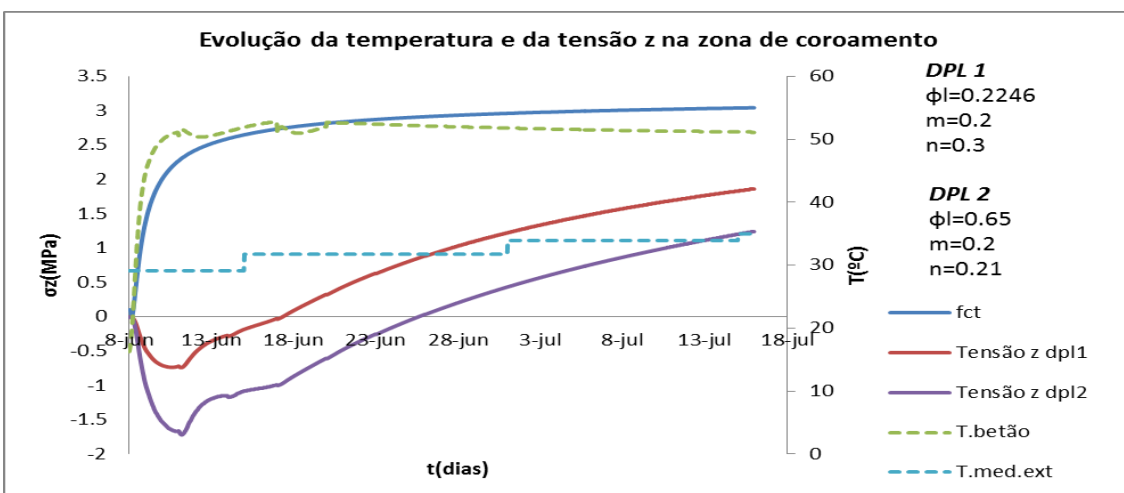
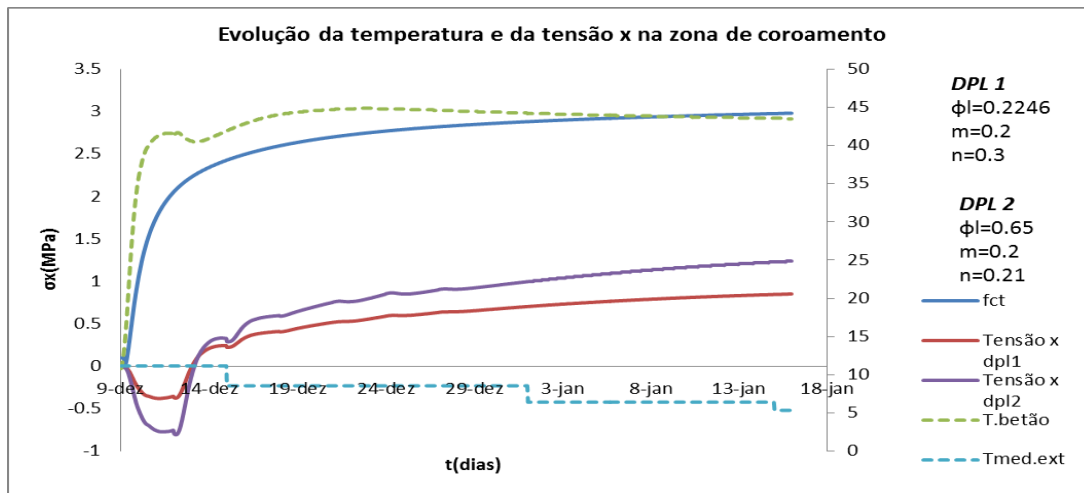
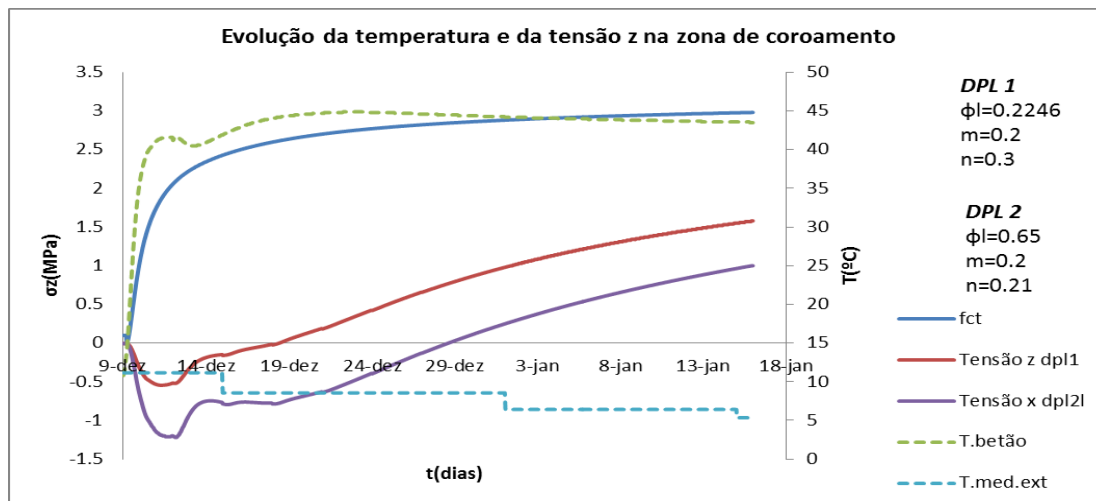


Fig.5.33- Evolução da temperatura e de σ_z .

4º CENÁRIO: Zona interiorFig.5.34- Evolução da temperatura e de σ_x .Fig.5.35- Evolução da temperatura e de σ_z .

Observando estas evoluções das tensões no coroamento, é possível verificar que num elemento interior do coroamento, durante a fase construtiva e após 20 dias da finalização da obra, não ocorre qualquer risco de fendilhação uma vez que as tensões, quer na direção x quer na direção z, não ultrapassem o valor de f_{ctm} . No entanto, verifica-se que as tensões nas duas direções continuam constantemente a aumentar sendo que em z são maiores devido ao tipo de análise usada. Este facto pode ser explicado devido ao contínuo decréscimo das temperaturas. No entanto, este modelo em estado plano de deformação sobrestima o grau de restrição na direção perpendicular ao plano e os valores de σ_z são apenas indicativos.

Nos gráficos seguintes apresentam-se os resultados obtidos para a última camada, camada essa que irá estar em contacto com a superfície.

1º CENÁRIO: Zona da superfície

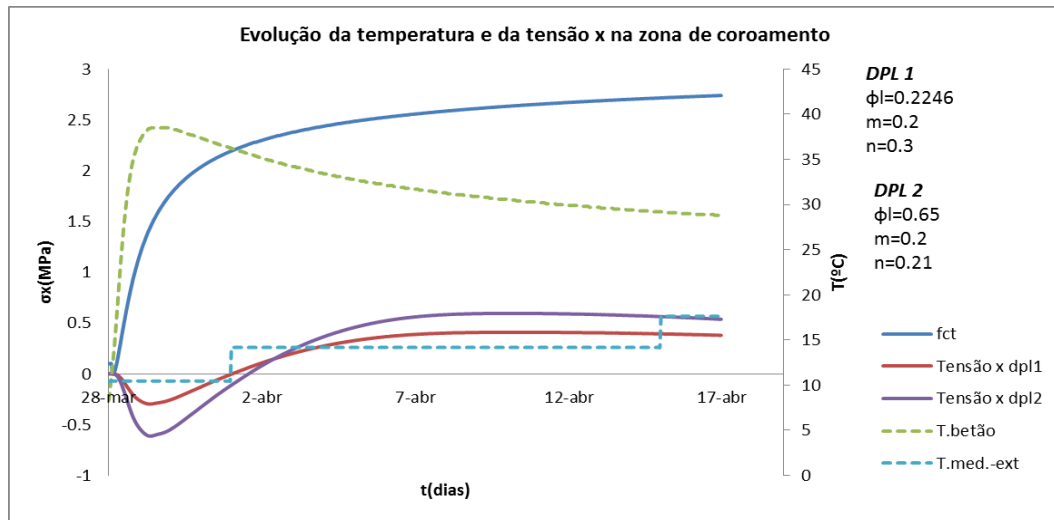


Fig.5.36- Evolução da temperatura e de σ_x .

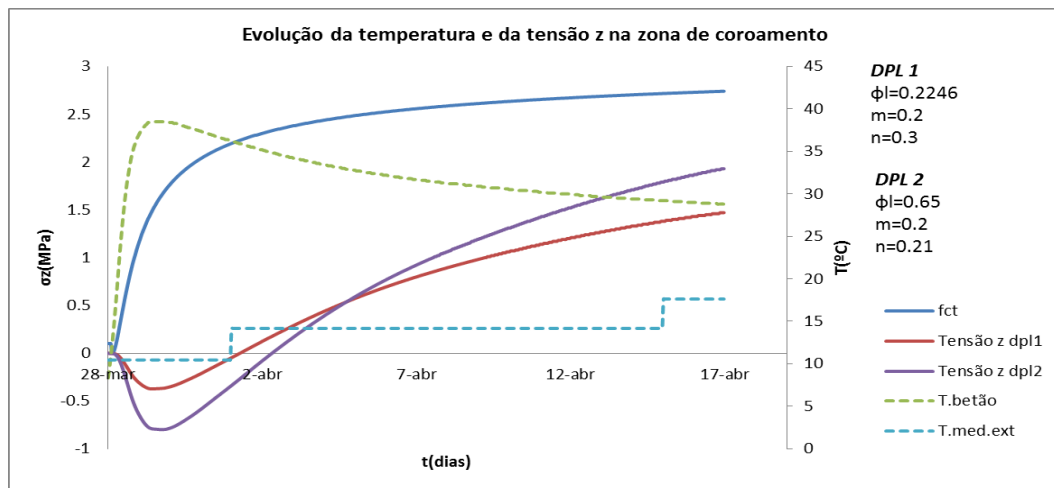


Fig.5.37- Evolução da temperatura e de σ_z .

2º CENÁRIO: Zona Superfície

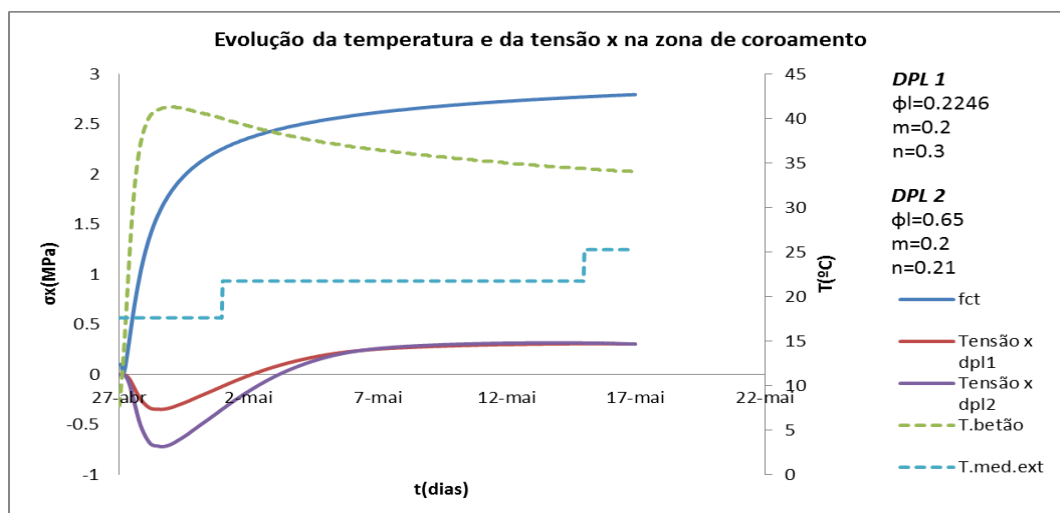


Fig.5.38- Evolução da temperatura e de σ_x .

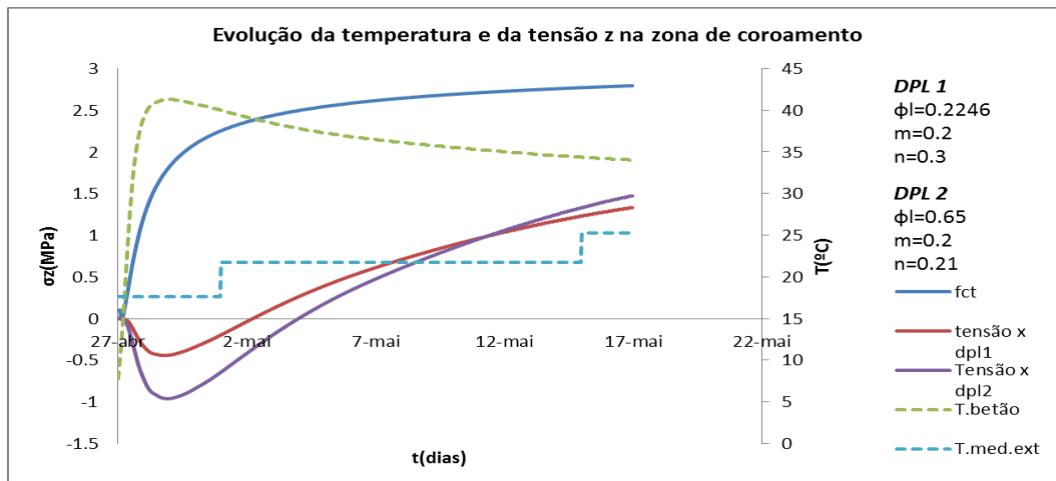


Fig.5.39- Evolução da temperatura e de σ_z .

3º CENÁRIO: Zona Superfície

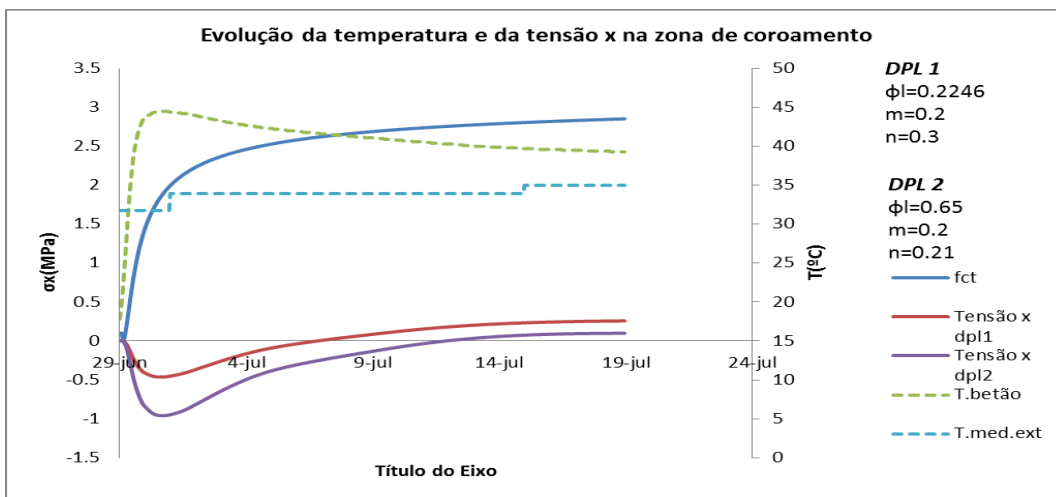


Fig.5.40- Evolução da temperatura e de σ_x .

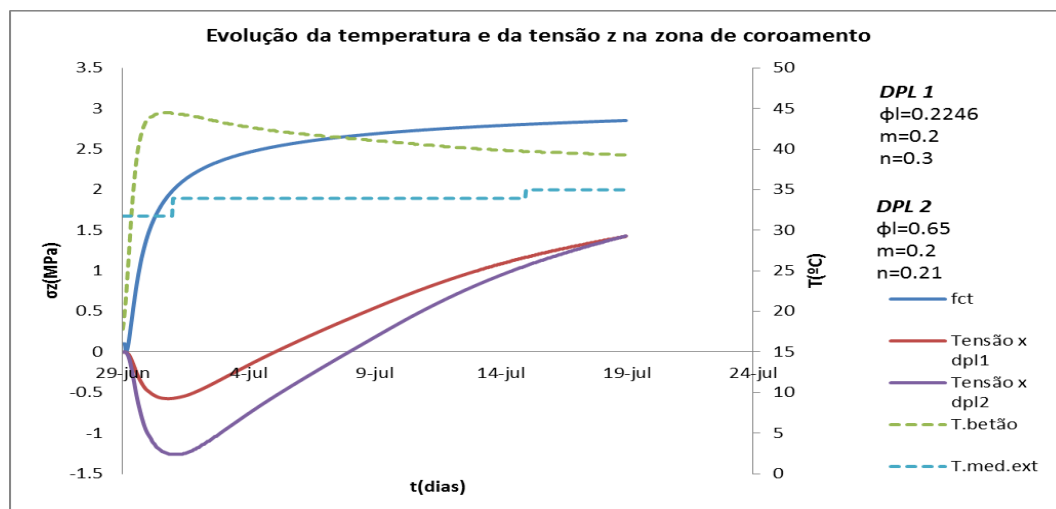
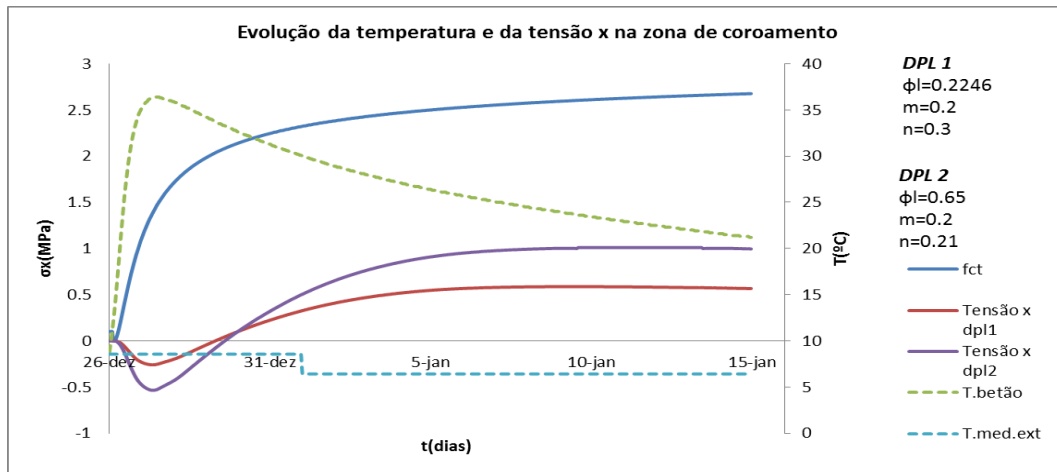
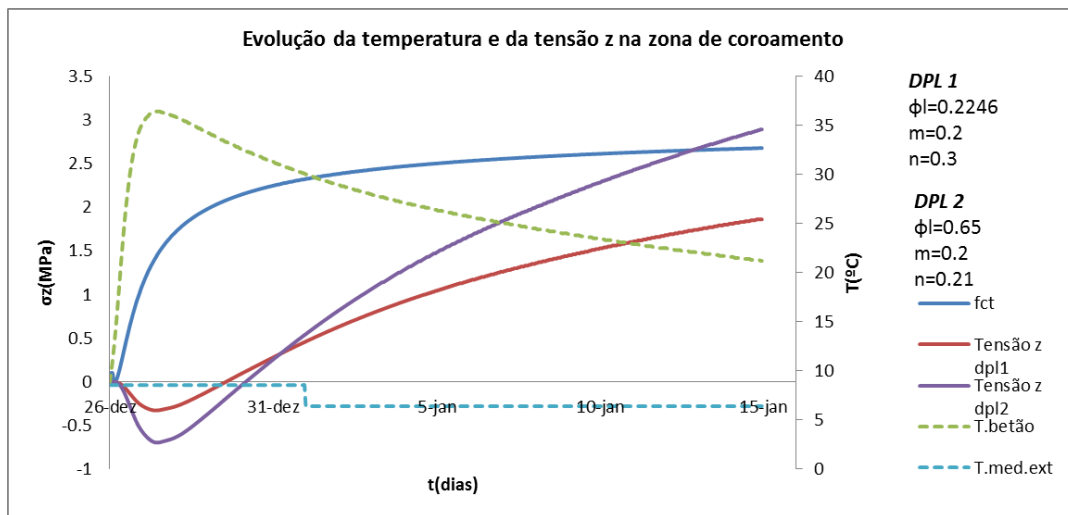


Fig.5.41- Evolução da temperatura e de σ_z .

4º CENÁRIO: Zona superfícieFig.5.42- Evolução da temperatura e de σ_x .Fig.5.43- Evolução da temperatura e de σ_z .

Analisando por fim a zona superficial do coroamento é observável que as tensões são maiores, nomeadamente na direção z. Tal explicação deve-se à situação de esta camada estar em contacto direto com o exterior, experimentando assim variações de temperaturas mais rápidas. Foi representada neste gráfico a evolução das tensões durante vinte dias após a betonagem e no cenário 4 já se verifica fendilhação superficial visto que se experimentam maiores gradientes térmicos. No entanto, mais uma vez se realça que nesta direção as tensões serão largamente sobrestimadas pelo modelo plano. Neste caso, o grau de restrição real na direção Z será reduzido uma vez que a altura em relação à fundação é superior a 2 vezes o espaçamento entre juntas. Concluindo, acerca desta zona do coroamento, para este período de análise (vinte dias após a betonagem final), não ocorre fendilhação. Todavia, como já foi exposto no problema da análise do núcleo, as análises não permitem retirar conclusões sobre o risco de fendilhação a longo prazo na zona interior do coroamento.

5.6. MEDIDAS PREVENTIVAS A TER NA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS

Como já se pôde verificar com os resultados observados nas análises anteriores, o controlo de temperaturas é um fator fundamental a ter aquando a colocação do betão. Sendo assim, existe uma regra prática que permite ter um controlo sobre a evolução de temperaturas. Essa regra remete para o facto de que a diferença de temperaturas junto à superfície da camada e um metro e meio/dois para o interior da camada, não pode exceder os 20°C. Caso isso aconteça, serve como sinal de que devem ser tomadas medidas preventivas, como por exemplo o arrefecimento artificial através de tubos de refrigeração ou a redução dos teores em cimento, para impedir que tal situação aconteça.

Como tal, para avaliar essa situação, irá ser feita uma verificação na zona do núcleo e do coroamento (zona interior) perante os cenários adotados anteriormente. Para a base não irá ser feita a análise pois os resultados mostraram a inevitabilidade de fendilhação face as condições adotadas.

Assim sendo, para a zona do núcleo:

1º CENÁRIO

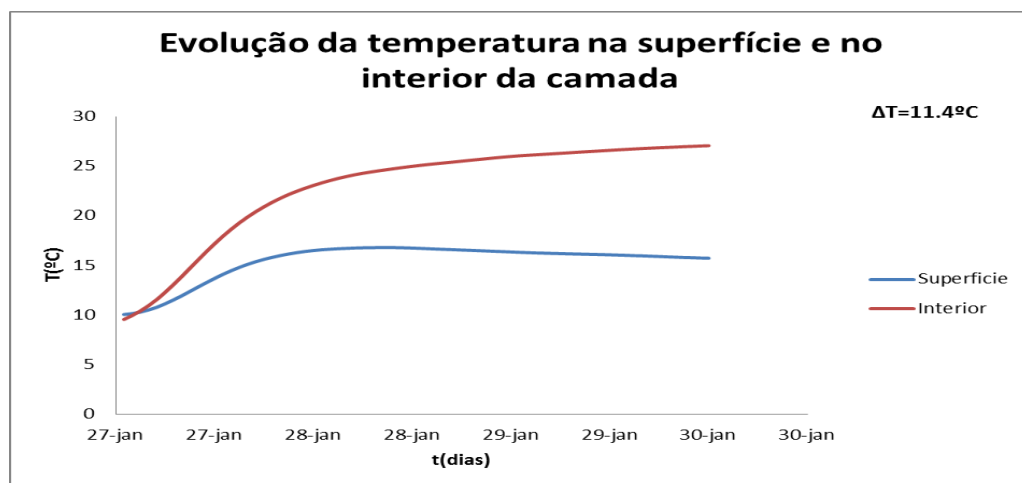


Fig.5.44- Evolução das temperaturas na superfície e no interior da camada.

2º CENÁRIO

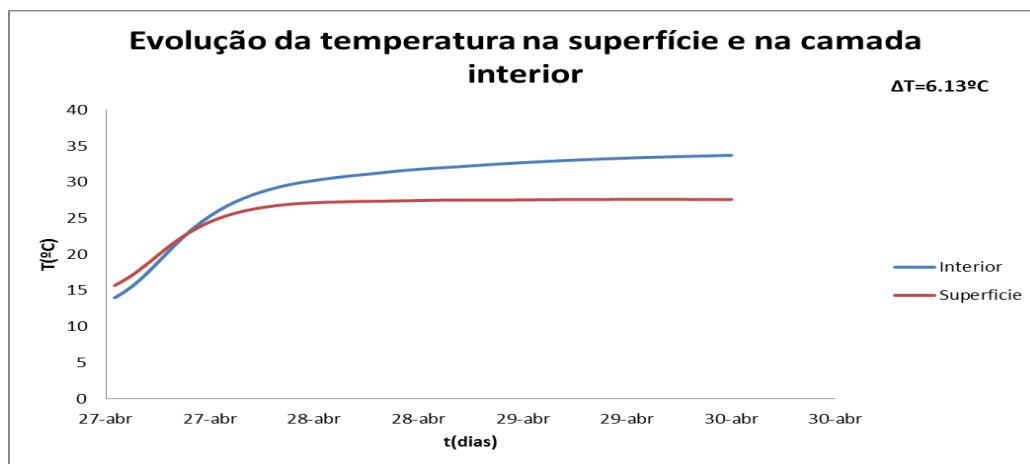


Fig.5.45- Evolução das temperaturas na superfície e no interior da camada.

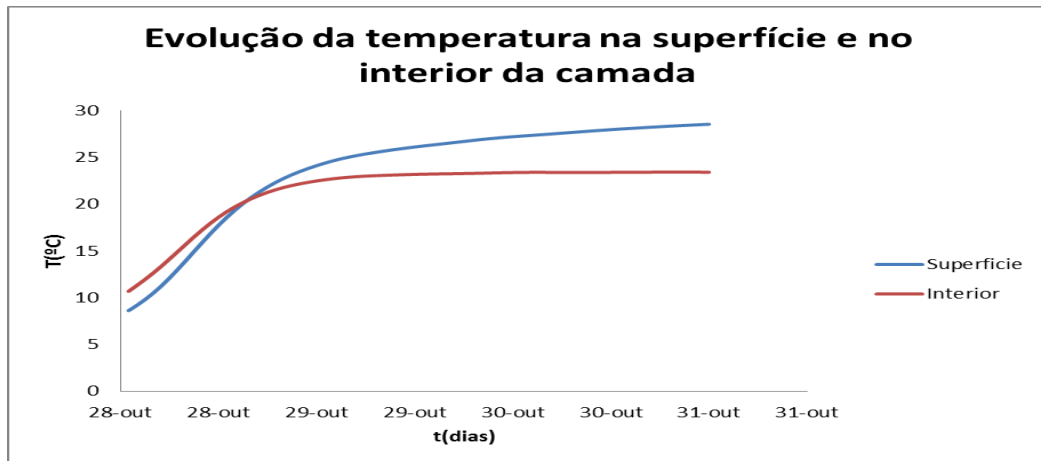
3º CENÁRIO

Fig.5.46- Evolução das temperaturas na superfície e no interior da camada.

Perante os cenários da zona do núcleo, pode-se concluir que a regra é cumprida.

Para a zona interior do coroamento:

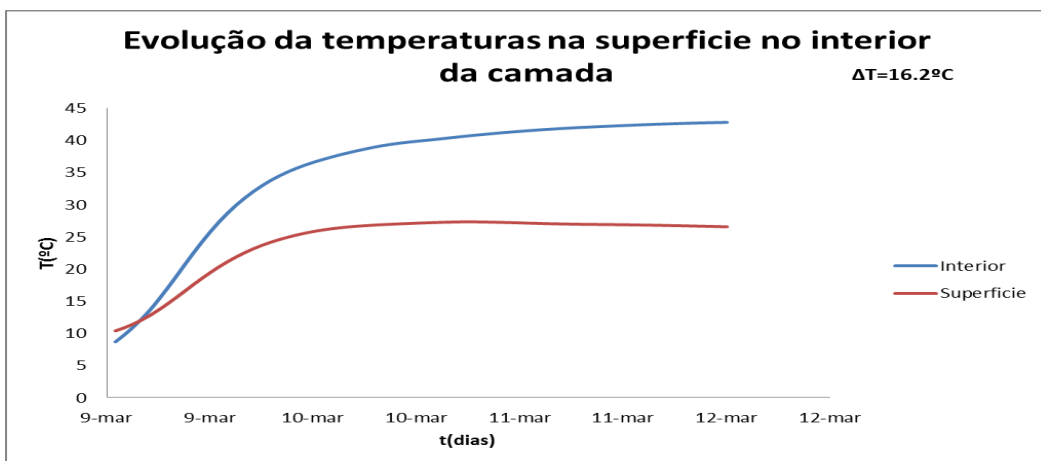
1º CENÁRIO

Fig.5.47- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.

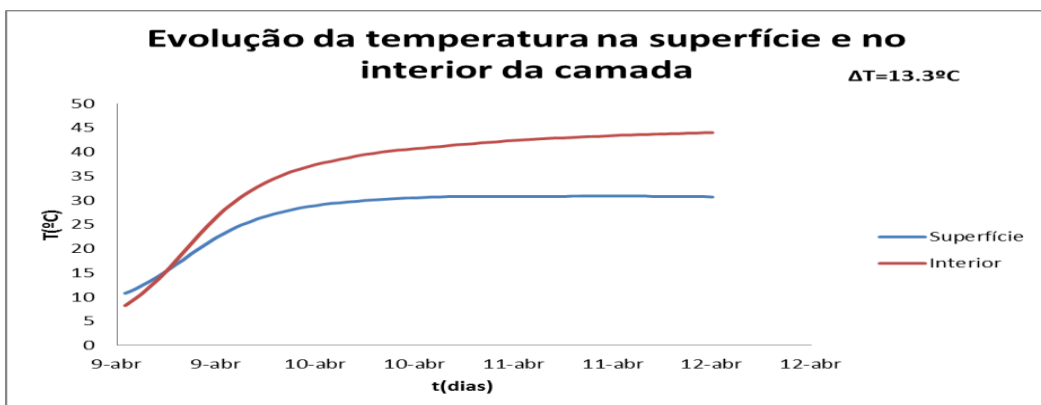
2º CENÁRIO

Fig.5.48- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.

3º CENÁRIO

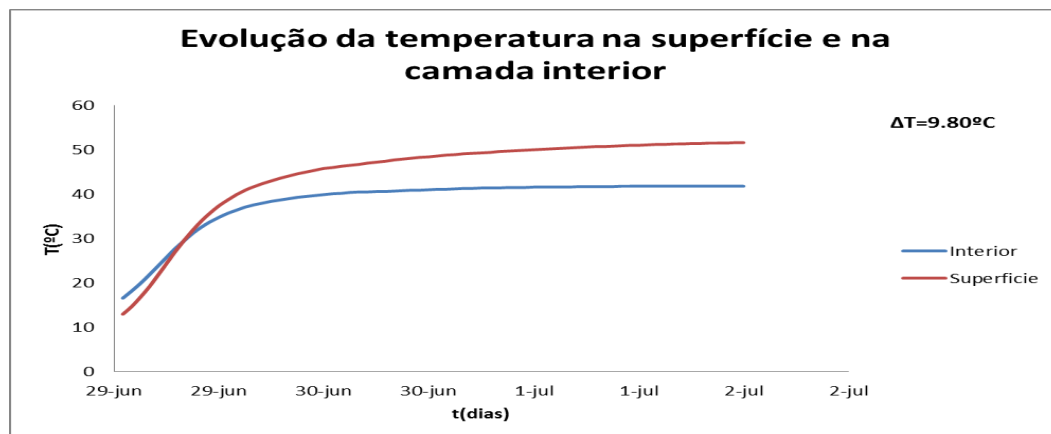


Fig.5.49- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.

4º CENÁRIO

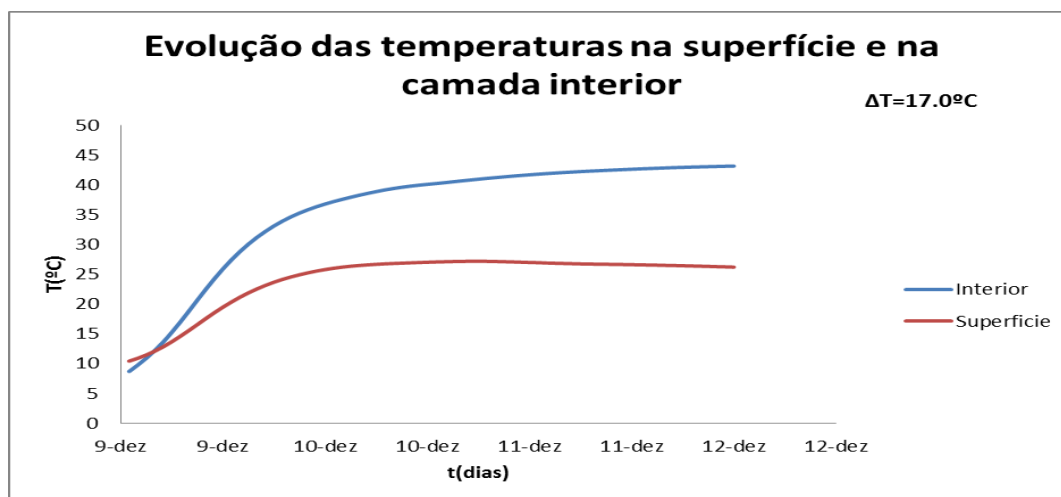


Fig.5.50- Evolução da temperatura na superfície e no interior da camada.

Analisando por fim a zona do coroamento, verifica-se que as variações de temperaturas são mais fortes. Esta situação era possível de prever uma vez que o tipo de betão usado para a zona do coroamento, como já se sabe, tem uma quantidade de cimento maior. Contudo, as variações de temperatura nestes 4 cenários não violam o critério enunciado dos 20°C . Verifica-se até que a diferença mais baixa de temperaturas verifica-se no 3º cenário em que apanha a altura do verão o que é fácil de explicar uma vez que as temperaturas exteriores nesta época são bastante elevadas o que não provoca fortes diferenças de temperatura tal como ocorre, por exemplo, no inverno.

6

CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Nesta dissertação pretendeu-se simular o comportamento térmico e mecânico de uma barragem de gravidade que está presentemente a ser construída. Numa fase inicial, efetuou-se um estudo paramétrico com base num modelo simplificado e representativo do núcleo da barragem.

Neste estudo, avaliou-se a influência de vários parâmetros, alguns com impacto na definição do faseamento construtivo, no valor das temperaturas obtidas durante a fase construtiva. Foi definido inicialmente um modelo base em que o betão usado contém 180 Kg/m^3 de ligante com 25% de cinzas volantes. Foi adotada uma condutibilidade de $2.1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, um calor específico de $2.6 \times 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{C}^{-1}$ e um coeficiente de convecção de $16.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. A sua temperatura de colocação foi de 15°C e a temperatura exterior de 18°C , correspondente à temperatura média anual. O tempo de espera de betonagem de cada camada foi de 3 dias e a espessura de cada camada de 2 metros. O tipo de análise efetuada correspondeu a uma análise unidirecional, contemplando apenas transmissão de calor na direção vertical.

Após as condições definidas para o modelo base, foram efetuadas as mudanças de parâmetros de forma a verificar a sua influência na evolução das temperaturas. São esses parâmetros, o tempo de espera, tendo sido estudados cenários com 5 e 7 dias, a mudança da espessura da camada, sendo que neste caso foi feita uma variação para camadas de 2.5 metros e 3 metros, e a mudança da temperatura de colocação do betão, tendo sido feito um estudo alternativo com uma temperatura de 10°C .

Os últimos estudos incidiram sobre as condições fronteira do problema térmico, em que se procedeu à modelação da senoide de temperaturas diárias de forma a serem simuladas de forma mais realista as condições extremas a que a barragem estaria sujeita. Ainda sobre estes estudos incidentes na temperatura exterior, foi modelada a radiação solar.

Conclui-se que nestes estudos paramétricos, os parâmetros mais preponderantes foram a temperatura de colocação do betão e o efeito da radiação solar, sendo que este último apenas é bastante influente na altura do verão. Tornou-se então necessário afetar a curva de temperaturas médias anuais de forma a incluir este efeito, tornando possível a sua inclusão de forma expedita no modelo global da barragem.

Feitos os estudos paramétricos, procedeu-se à elaboração do modelo final. Este modelo foi modelado em estado plano de deformação em que se admitiu como pressuposto as extensões impedidas na direção perpendicular ao plano de análise. Este modelo foi objeto de uma análise térmica, e de uma análise mecânica, considerada desacoplada. Na análise mecânica foi avaliado o efeito da fluência no valor das tensões calculadas.

Este modelo foi elaborado com dois tipos de betão, um betão mais pobre a nível de quantidade de cimento no núcleo, igual ao usado no estudo paramétrico e outro betão superficial, com uma maior quantidade de cimento.

Neste modelo foram avaliadas três zonas da barragem, a base da barragem, a zona do núcleo e a zona do coroamento. De forma a serem avaliadas estas zonas, o modelo foi submetido a vários cenários de forma a avaliar o seu risco de fendilhação. Estes cenários corresponderam às alturas do ano em que se iniciaram as betonagens.

Os resultados obtidos mostram que na zona da base da barragem, a ocorrência de fendilhação revela a consequência de se ter usado um betão muito rico em cimento. Na zona do núcleo, durante o tempo de análise que cobre o faseamento construtivo, o estado de tensão mostra que nas duas direções consideradas o risco de fendilhação é muito baixo. Contudo, sendo o processo de dissipação de calor bastante lento, nada se pode concluir quanto à fendilhação a longo prazo. Para a zona do coroamento, revelou-se que o seu interior, novamente dentro do tempo de análise que cobre o faseamento construtivo, que o risco de fendilhação é também muito reduzido. A zona mais afetada está pois na camada superficial uma vez que esta está exposta às oscilações das temperaturas exteriores.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta o tipo de estudo efetuado nesta dissertação, e reconhecendo a complexidade a que este está sujeito, apresentam-se sugestões para aproximar melhor os resultados da realidade e para contornar resultados com que se deparou:

- O modelo que se desenvolveu deve ter suporte em ensaios laboratoriais para caracterizar corretamente o tipo de betão utilizado em obra, as propriedades mecânicas evolutivas (resistência à tração e módulo de elasticidade), a fluência, a retração e a maturidade.
- A adoção de um modelo tridimensional para uma melhor estimativa das tensões para fora do plano de análise. Consideração da dimensão na direção z correspondente à que realmente se adotou na obra ao invés de se usar uma infinita como se adotou neste modelo.
- A adoção de um maior tempo de análise de forma a prever as tensões que advém do arrefecimento lento da barragem até à temperatura de equilíbrio.

BIBLIOGRAFIA

- Azenha, Miguel Ângelo Dias - Comportamento do betão nas primeiras idades fenomenologia e análise termo-mecânica. Porto: [s.n.], 2004. Disponível em WWW:
<http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=4236>.
- Azenha, Miguel Ângelo Dias - Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages. Porto: [s. n.], 2009. Disponível em WWW:
<http://digitool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=145221>.
- Azenha, Miguel; Faria, Rui - Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower—A case study. *Engineering Structures*. Vol. 30. n.º 9 (2008). p. 2392-2400. Disponível em WWW:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029608000229>>. 0141-0296
- Azenha, Miguel; Lameiras, Rodrigo; Costa, Ângelo Gonçalo Araújo Silva; Barros, Joaquim AO - Aplicação de sistema baseado em bainhas de pré-esforço ventiladas para redução do risco de fissuração de origem térmica do betão nas primeiras idades. (2012).
- Camelo, Armando; Antunes, Nuno; Botelho, Diogo; Matos, Domingos S - Principais condicionamentos de projecto para uma barragem de gravidade em BCC.
- CEN - Eurocódigo2: Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. 2004.
- Çengel, Yunus A.; Ghajar, Afshin J. - Heat and mass transfer fundamentals and applications. New York: McGraw-Hill, 2011. 978-007-131112-0
- Coelho, Nailde de Amorim - Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa. (2012).
- Faria, Rui; Azenha, Miguel; Figueiras, Joaquim A - Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cement and concrete composites*. Vol. 28. n.º 6 (2006). p. 572-585. 0958-9465
- Gutstein, Daniela - Estudo das tensões em fundações de barragens de gravidade de concreto pelo método de elementos finitos. (2003).
- Lameiras, Rodrigo; Azenha, Miguel; Barros, Joaquim AO - Otimização do faseamento construtivo de estruturas constituídas por grandes volumes de betão: estudo do canal do descarregador de cheias de uma barragem. (2012).
- Leitão, Luís; Azenha, Miguel; Faria, Rui - Modelo termo-higro-mecânico: Descrição e aplicação do modelo aos provetes de betão estudados nas Tarefas 2 e 3.
- Peres, LDP; Barbosa, MP; Pinto, RCA - Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projecto-Produção em Concreto Pré-Moldado.
- Silveira, António F. da - <<As>> variações de temperatura nas barragens. Lisboa: LNEC, 1961.

Silveira, António Ferreira da - <<O>> comportamento térmico das barragens de betão. Lisboa: LNEC, 1958.

Silveira, António Paulo Campos da - <<A>> influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado pré-esforçado. Lisboa: LNEC, 1996. Disponível em WWW: <http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=38391>. 972-49-1678-2

Teles, Madalena Maria Matos Silva - Comportamento térmico de barragens de betão. Lisboa: LNEC, 1986.

U.S.A.C.E - Gravity Dam Design. DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON, DC 20314-1000. (1995).

Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; Zhu, J. Z. - <<The>> finite element method its basis and fundamentals. Amsterdam: Elsevier, 2005. 978-07506-6320-5

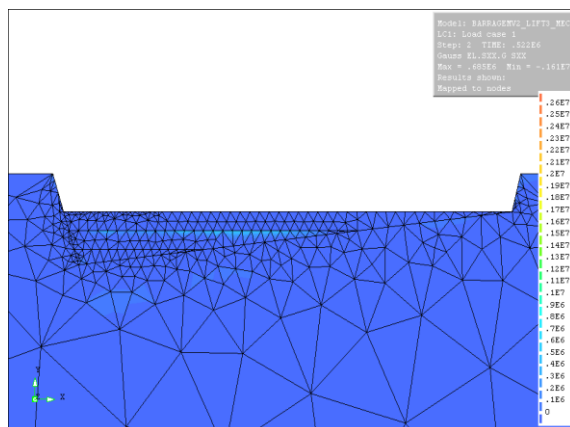
ANEXOS

A. MAPAS DE TENSÕES E TEMPERATURAS AO LONGO DA BARRAGEM

A.1. MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES NA BASE DA BARRAGEM (ESCALA DE 0 A 2.6 MPa DE 0.1 EM 0.1 MPa)

1º CENÁRIO

Evolução das tensões em x para dp11:



Evolução das tensões x para dp12:

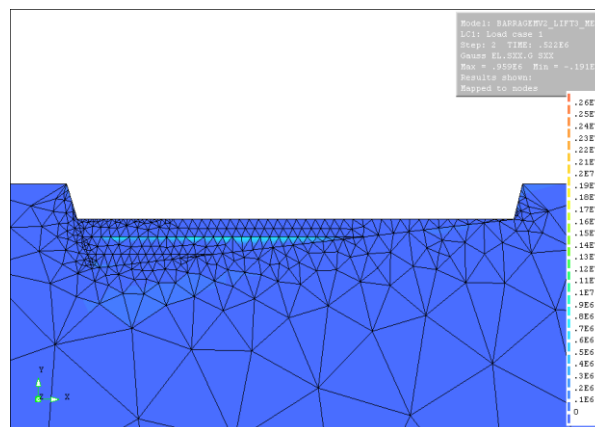


Fig. A1.1-Tensões em x após a betonagem da camada 3.

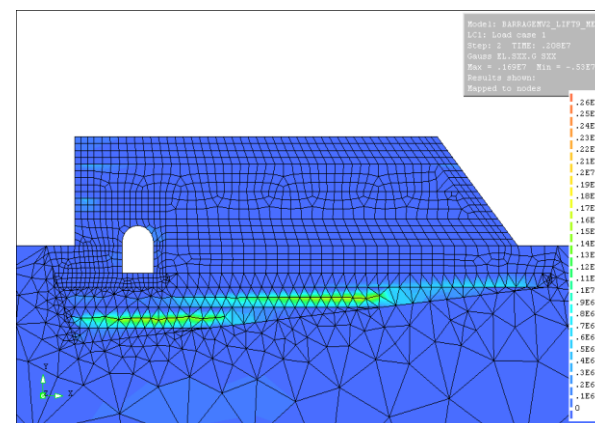
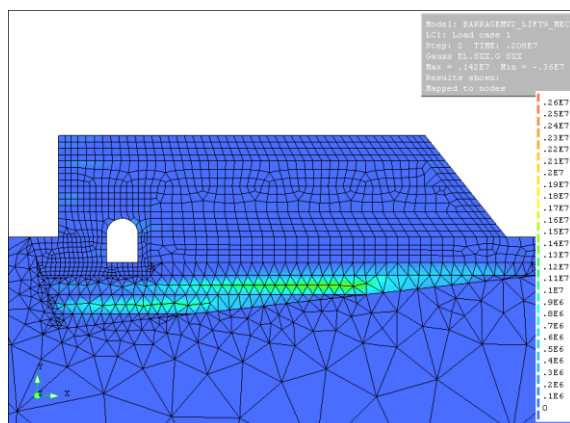


Fig.A1.2-Tensões em x após a betonagem da camada 9.

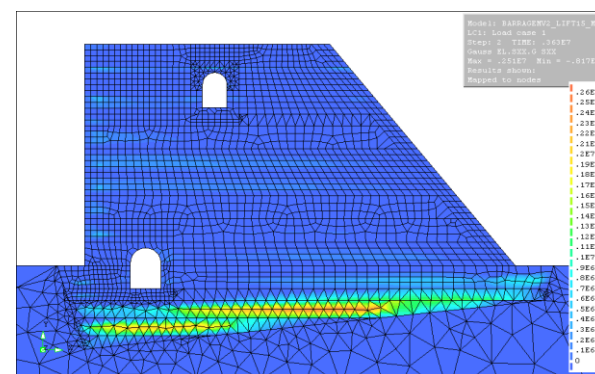
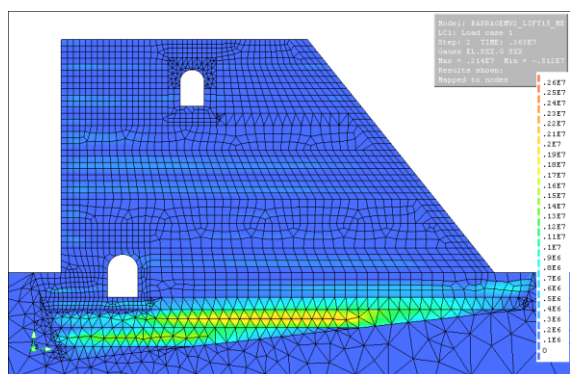


Fig. A1.3-Tensões em x após a betonagem da camada 15

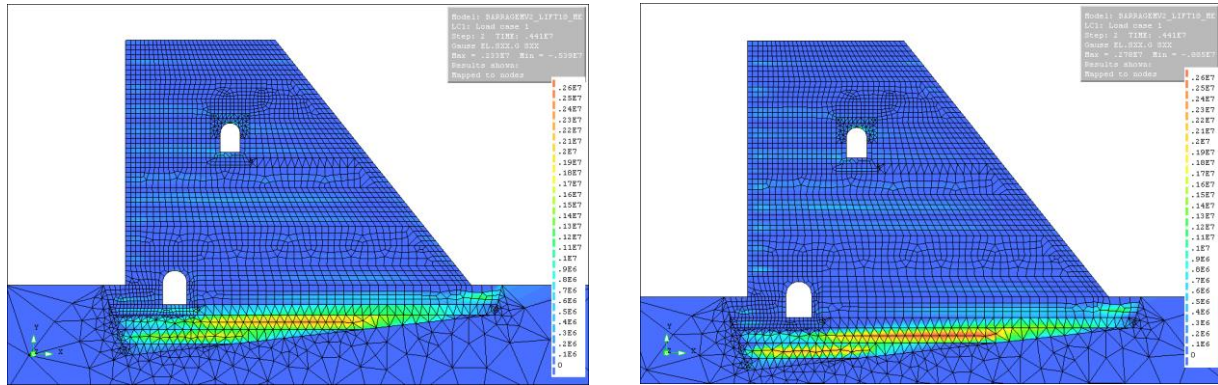
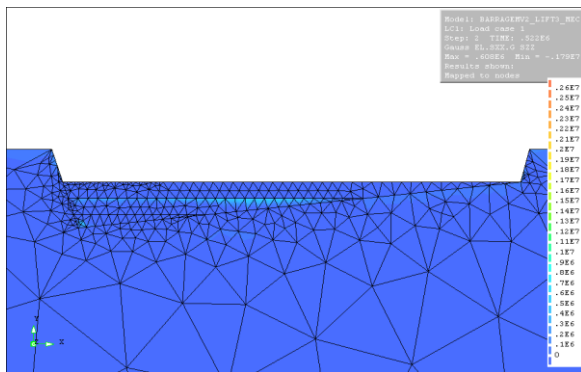


Fig.A1.4-Tensões em x após a betonagem da camada 18.

Evolução das tensões em z para dpl1:



Evolução das tensões z para dpl2:

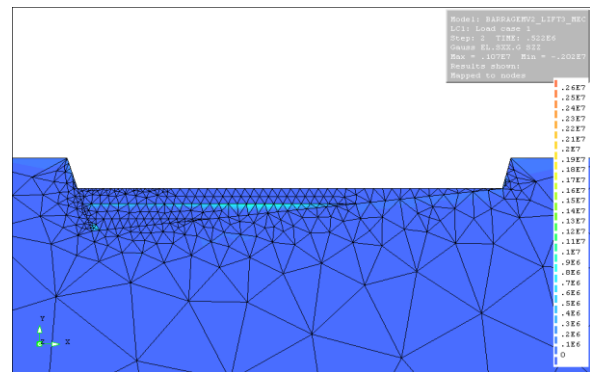


Fig.A1.5-Tensões em z após a betonagem da camada 3.

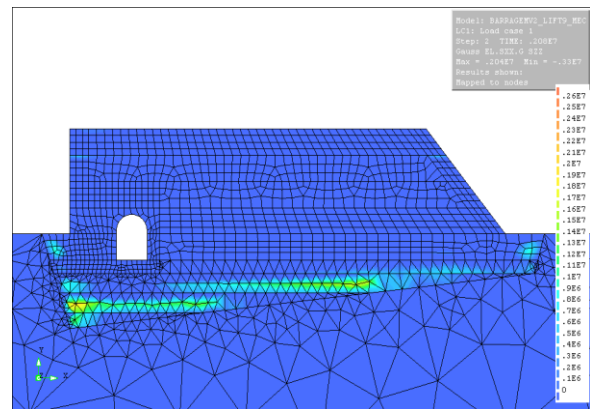
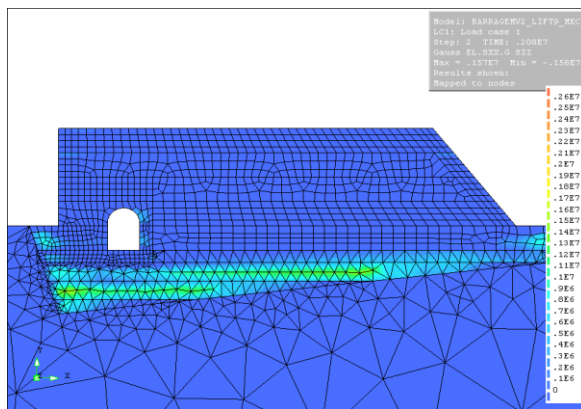


Fig.A1.6-Tensões em z após a betonagem da camada 9.

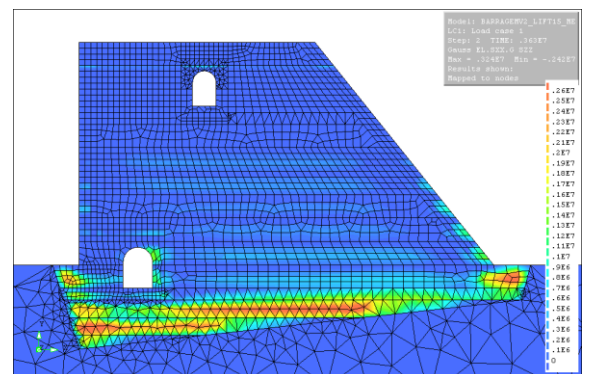
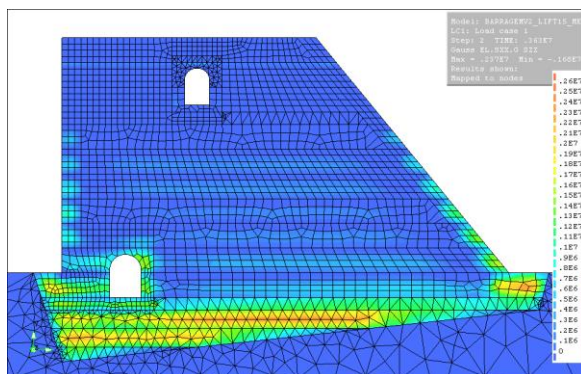


Fig.A1.7-Tensões em z após a betonagem da camada 15.

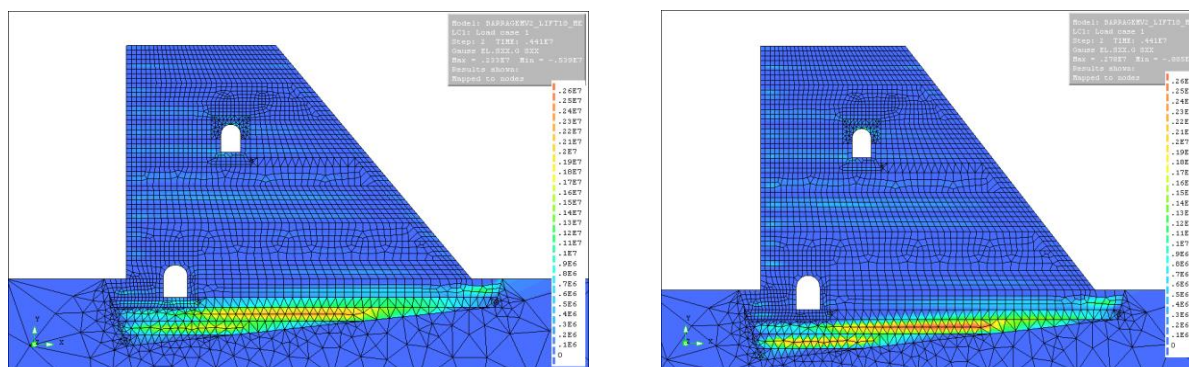
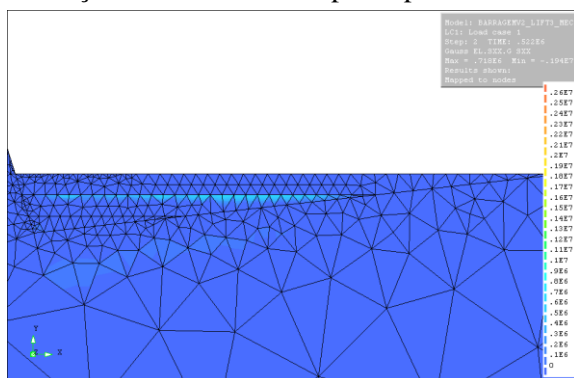


Fig.A1.8-Tensões em z após a betonagem da camada 18.

2º CENÁRIO

Evolução das tensões em x para dp11:



Evolução das tensões x para dp12:

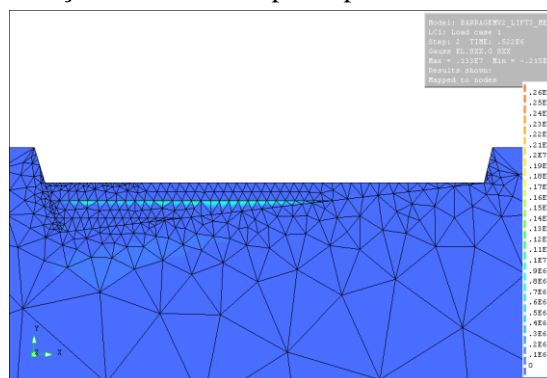


Fig.A1.9- Tensões em x após a betonagem da camada 3.

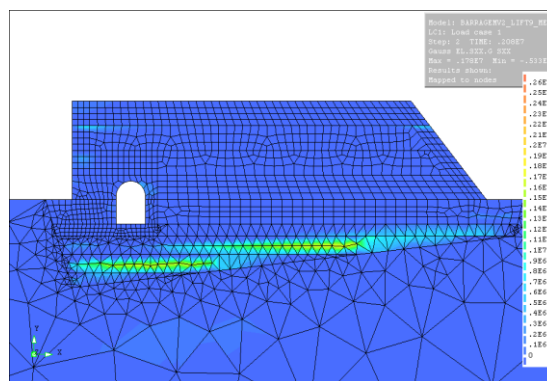
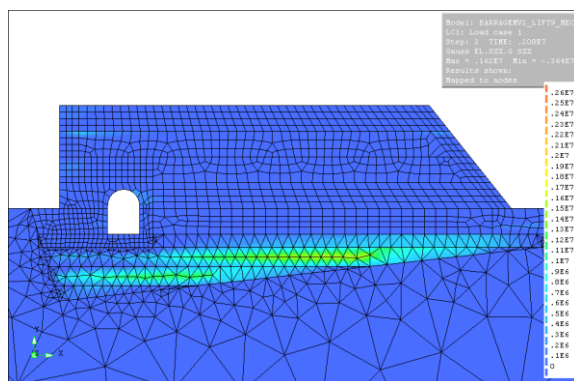


Fig.A1.10- Tensões em x após a betonagem da camada 9.

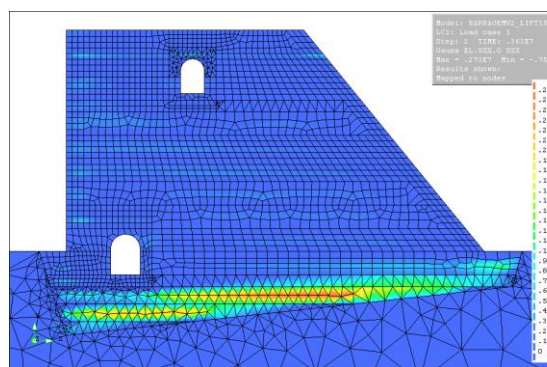
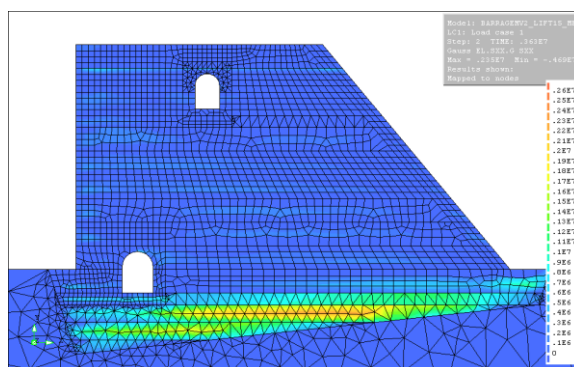


Fig.A1.11- Tensões em x após a betonagem da camada 15.

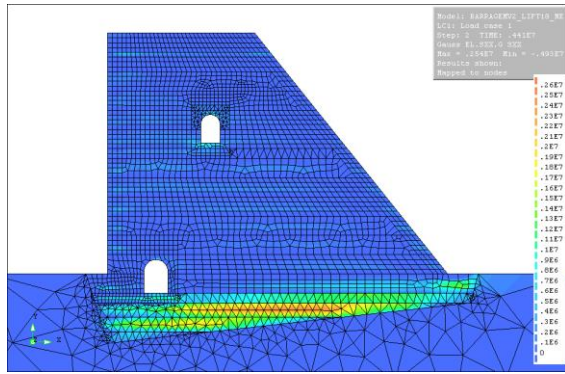
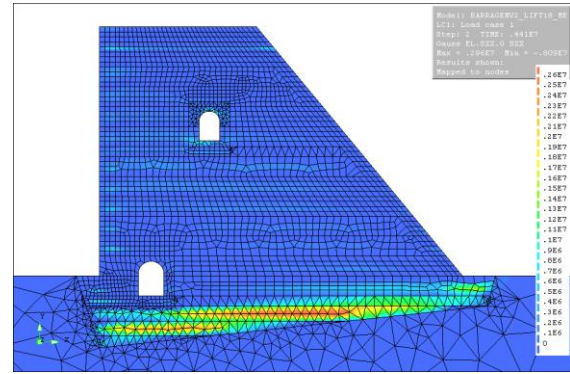
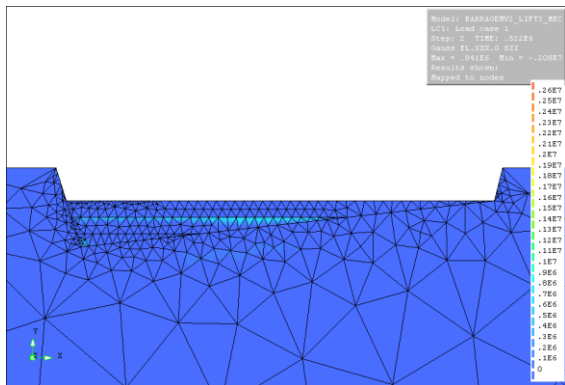


Fig.A1.12- Tensões em x após a betonagem da camada 15.



Evolução das tensões em z para dpl1:



Evolução das tensões z para dpl2:

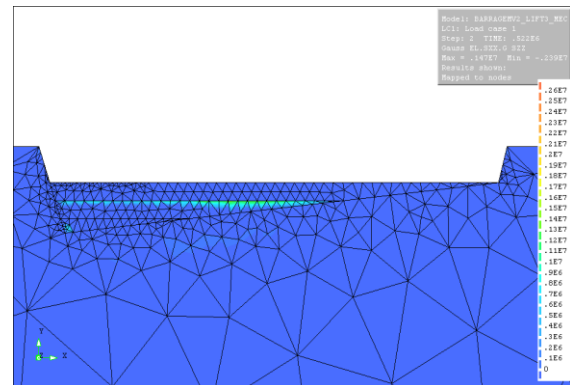


Fig.A1.13- Tensões em z após a betonagem da camada 3.

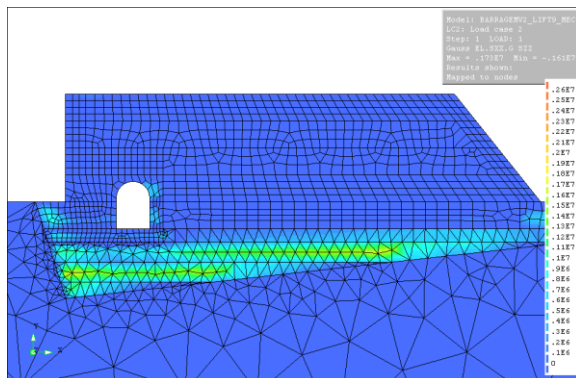


Fig.A1.14- Tensões em z após a betonagem da camada 9.

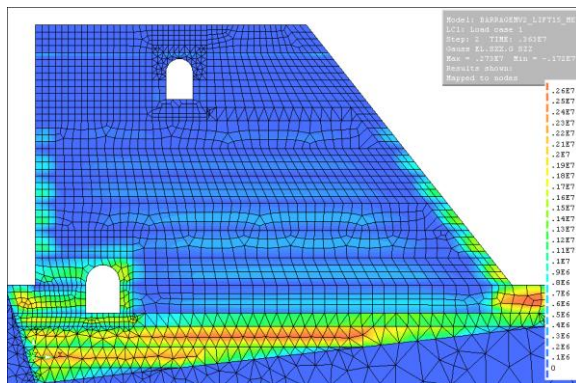
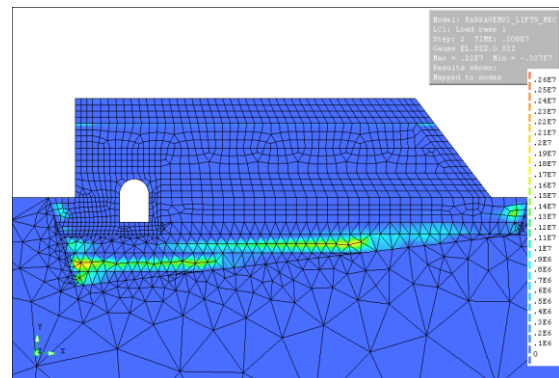
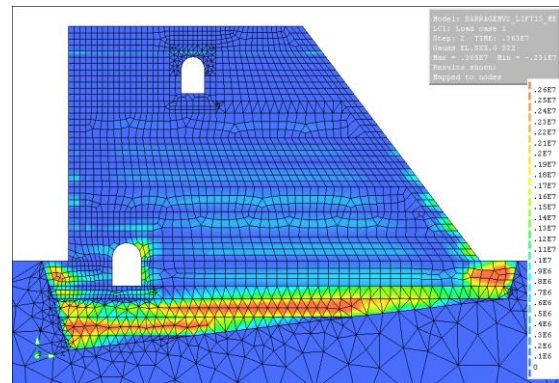


Fig.A1.14- Tensões em z após a betonagem da camada 15.



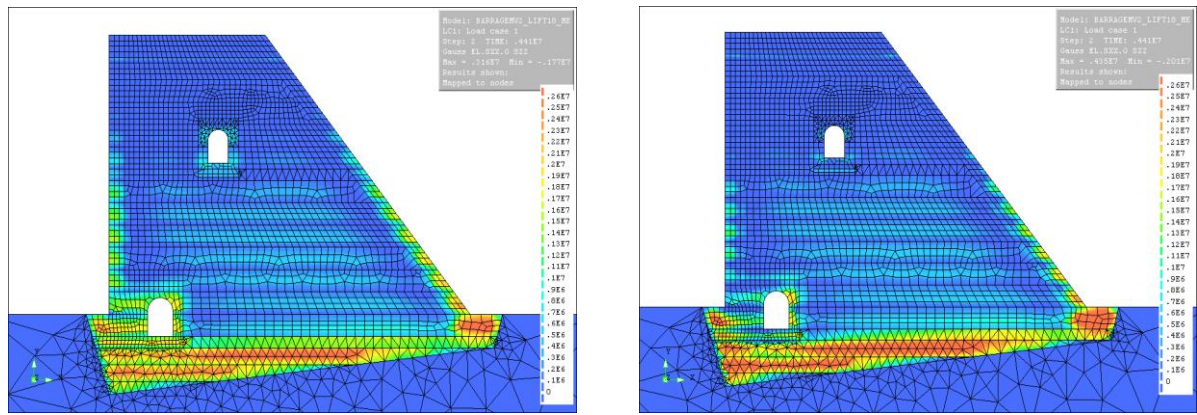
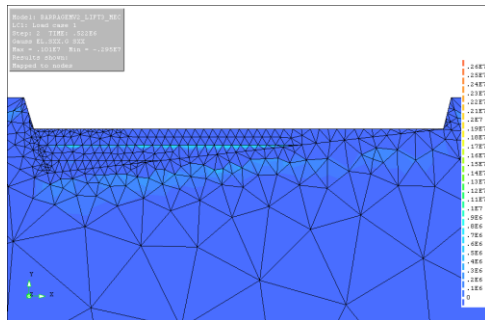


Fig.A1.14- Tensões em z após a betonagem da camada 18.

3º CENÁRIO

Evolução das tensões em x para dpl1:



Evolução das tensões x para dpl2

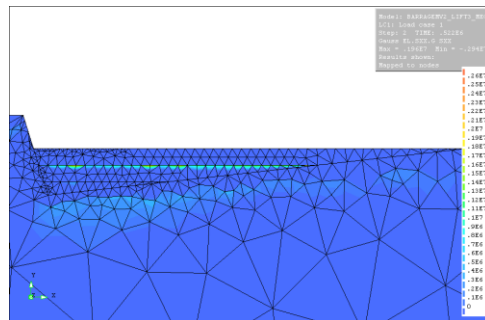


Fig.A1.15- Tensões em x após a betonagem da camada 3.

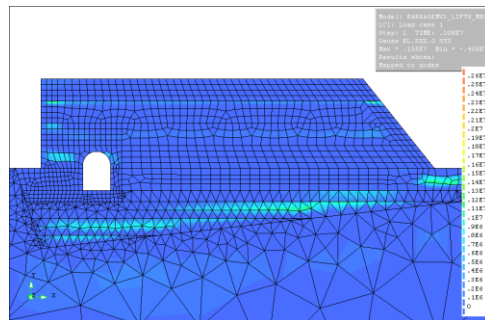
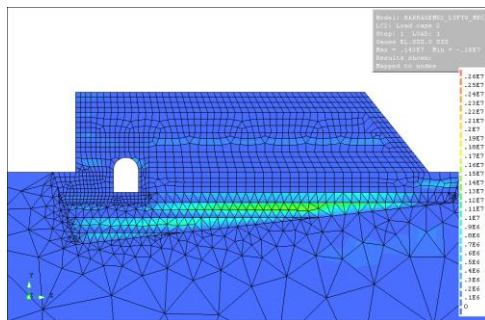


Fig.A1.16- Tensões em x após a betonagem da camada 9.

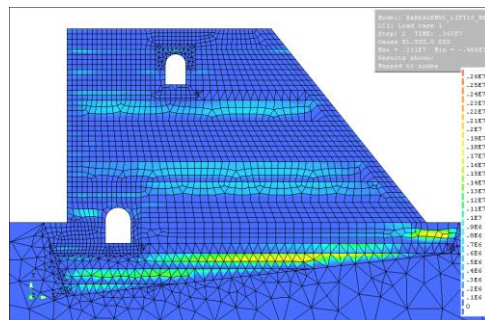
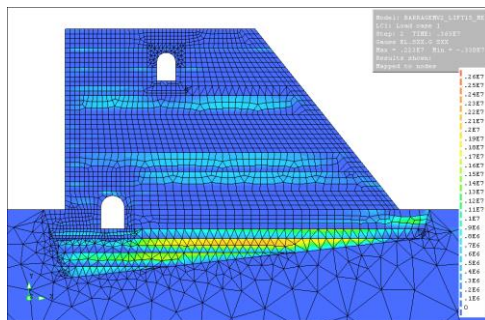


Fig.A1.17- Tensões em x após a betonagem da camada 15.

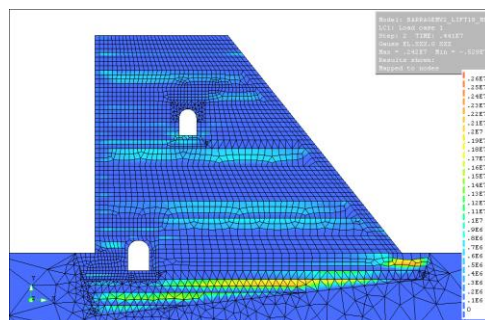
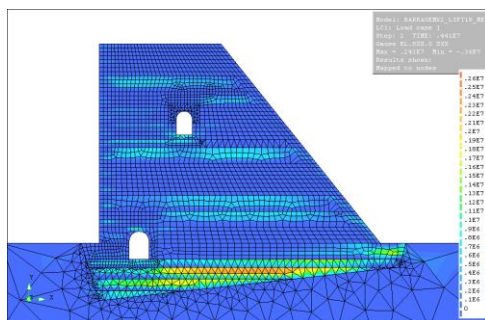
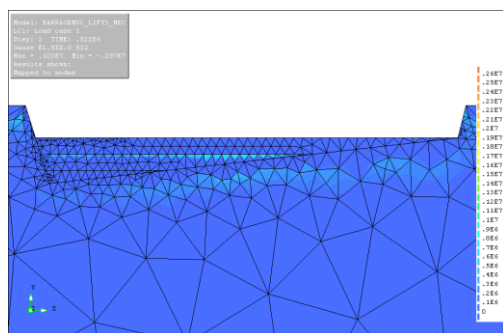


Fig.A1.17- Tensões em x após a betonagem da camada 18.

Evolução das tensões em z para dpl1:



Evolução das tensões z para dpl2:

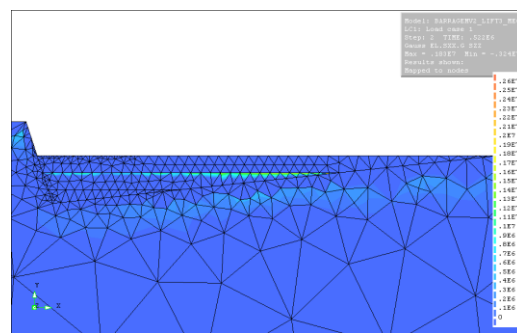


Fig.A1.18- Tensões em z após a betonagem da camada 3.

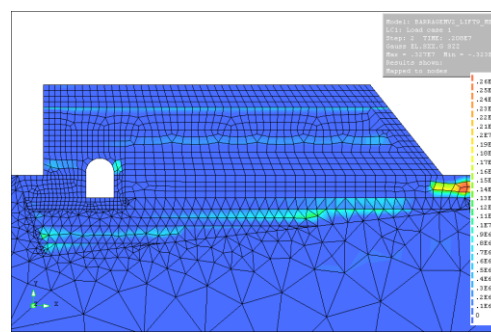
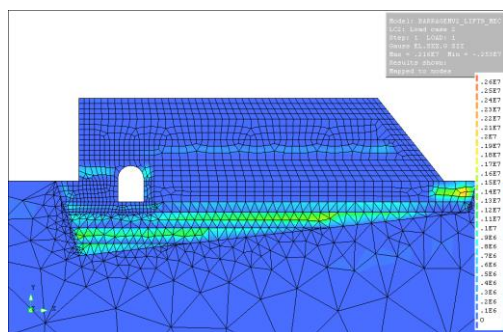


Fig.A1.19- Tensões em z após a betonagem da camada 9.

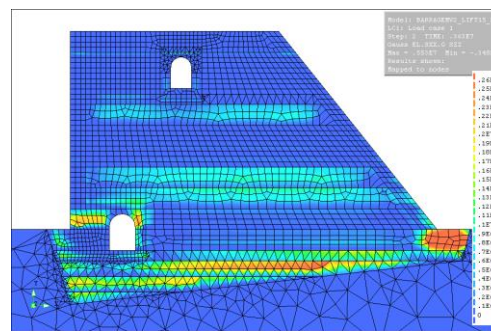
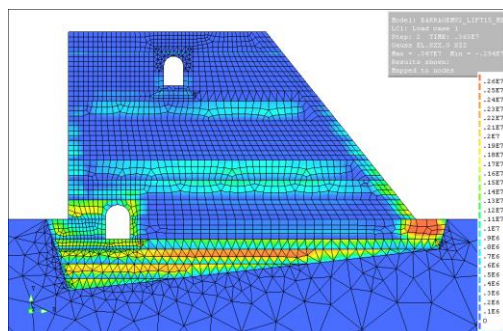


Fig.A1.20- Tensões em z após a betonagem da camada 15.

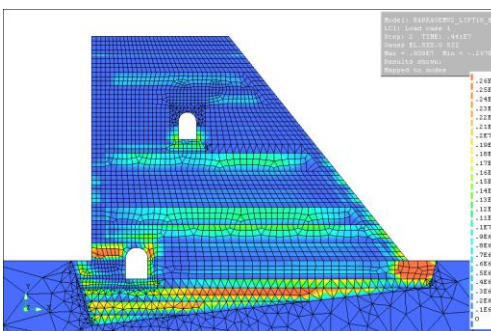
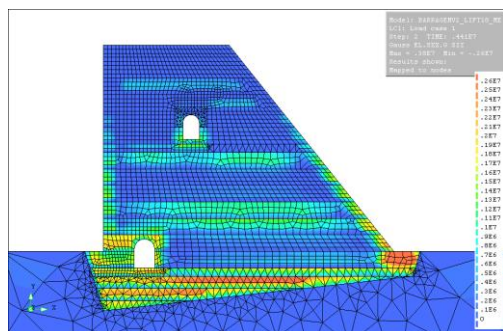
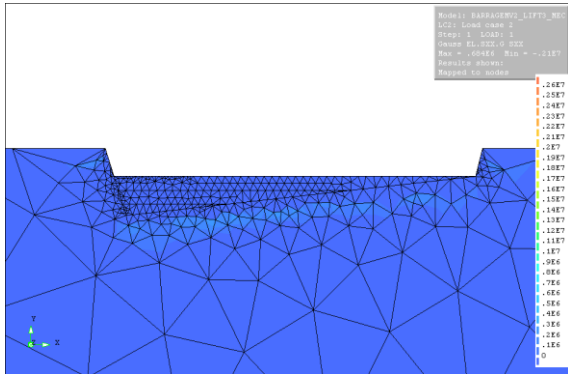


Fig.A1.21- Tensões em z após a betonagem da camada 18.

4º CENÁRIO

Evolução das tensões em x para dpl1:



Evolução das tensões x para dpl2:

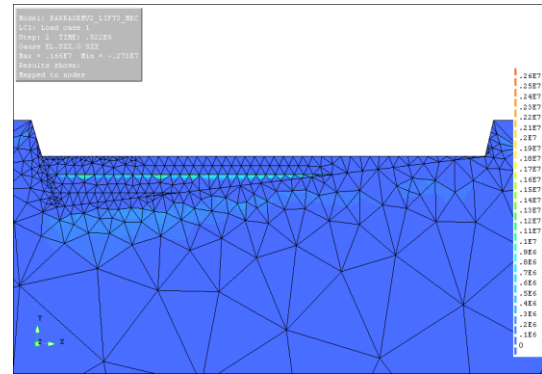


Fig.A1.22- Tensões em x após a betonagem da camada 3.

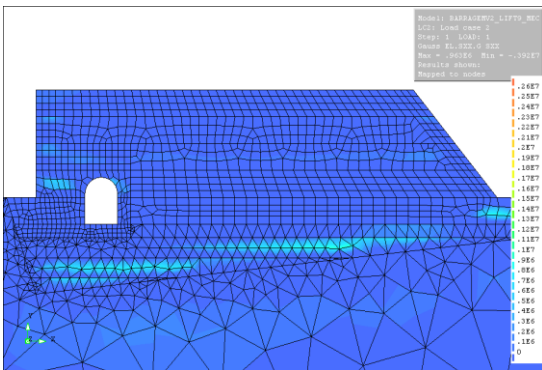
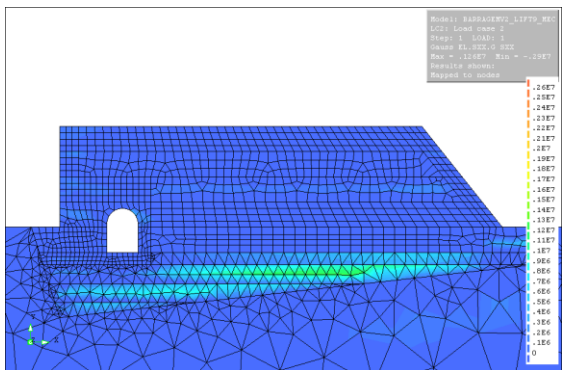


Fig.A1.22- Tensões em x após a betonagem da camada 9.

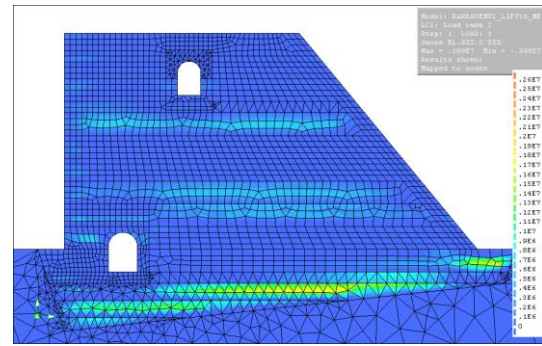
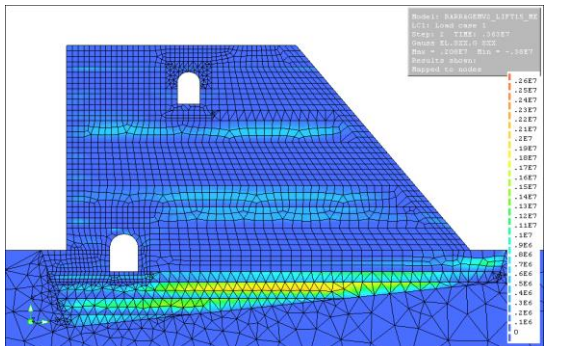


Fig.A1.22- Tensões em x após a betonagem da camada 15.

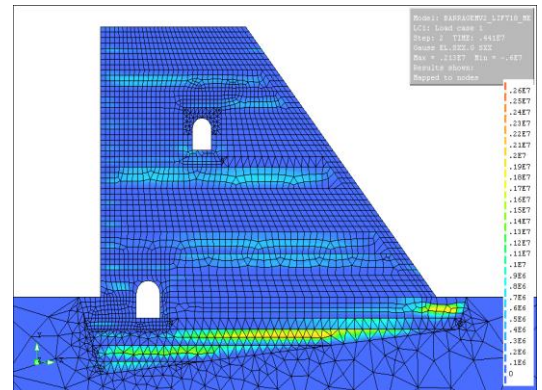
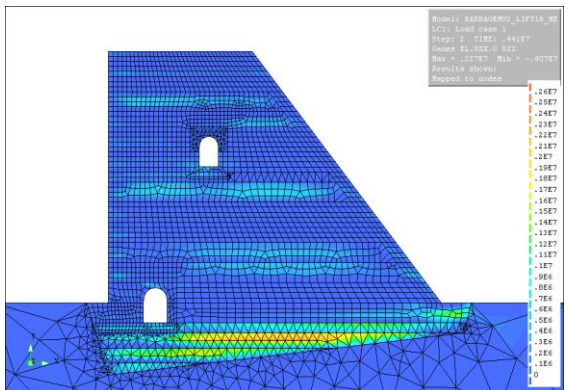


Fig.A1.23- Tensões em x após a betonagem da camada 18.

Evolução das tensões em z para dpl1:

Evolução das tensões z para dpl2:

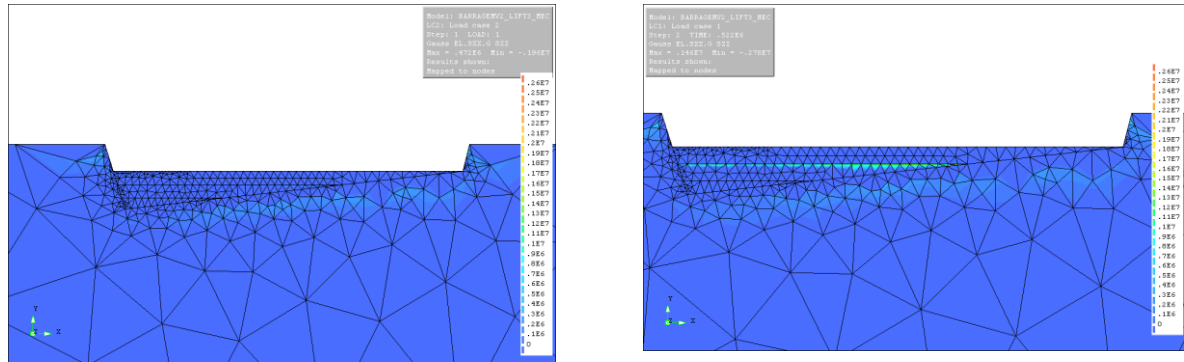


Fig.A1.24- Tensões em z após a betonagem da camada 3.

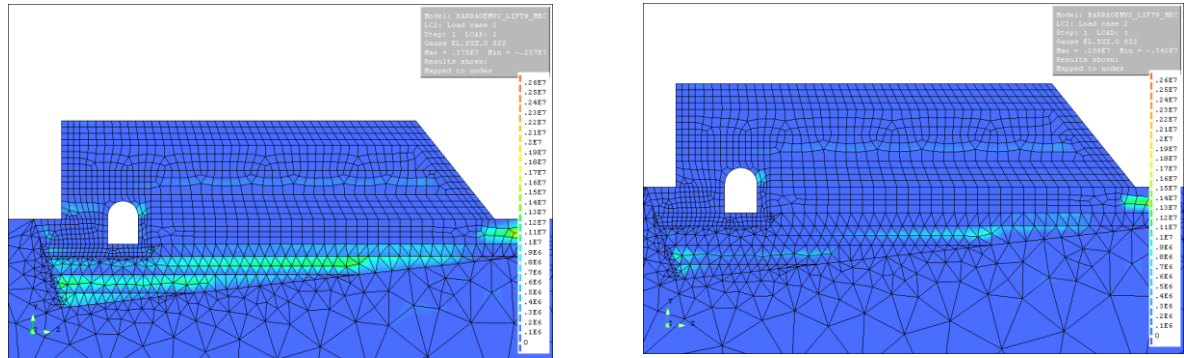


Fig.A1.25- Tensões em z após a betonagem da camada 9.

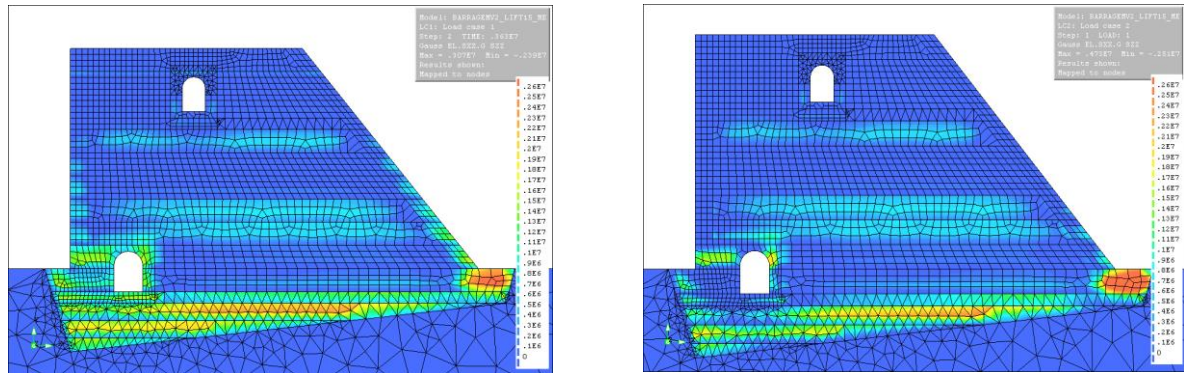


Fig.A1.26- Tensões em z após a betonagem da camada 15.

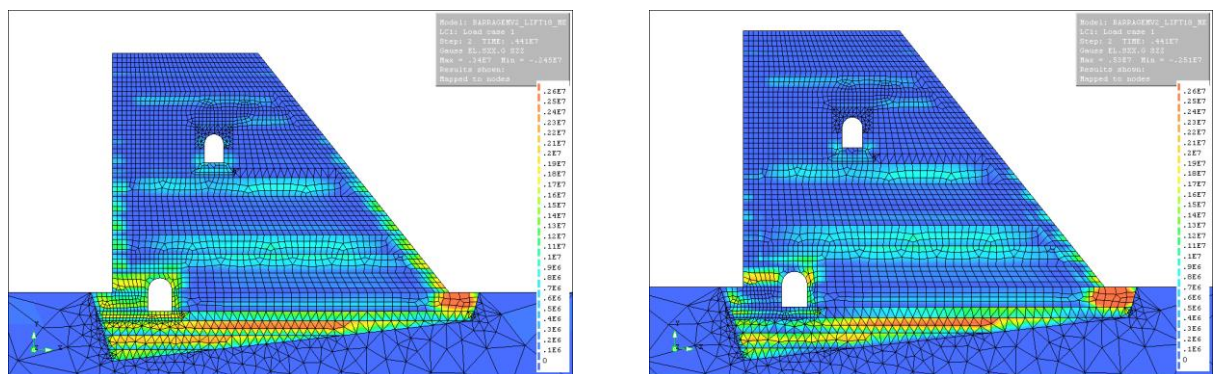


Fig.A1.26- Tensões em z após a betonagem da camada 18.

A.2. MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NA BASE DA BARRAGEM

1º CENÁRIO

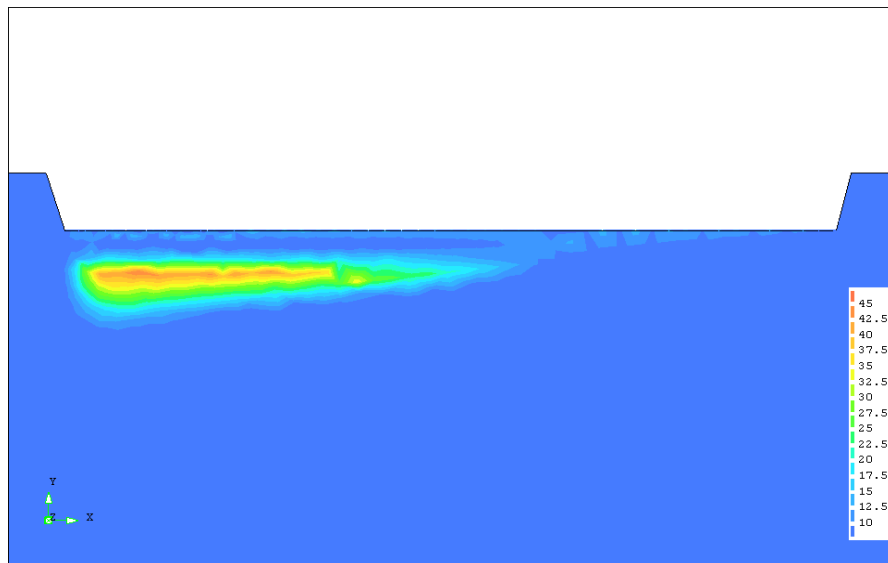


Fig.A2.1- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 3.

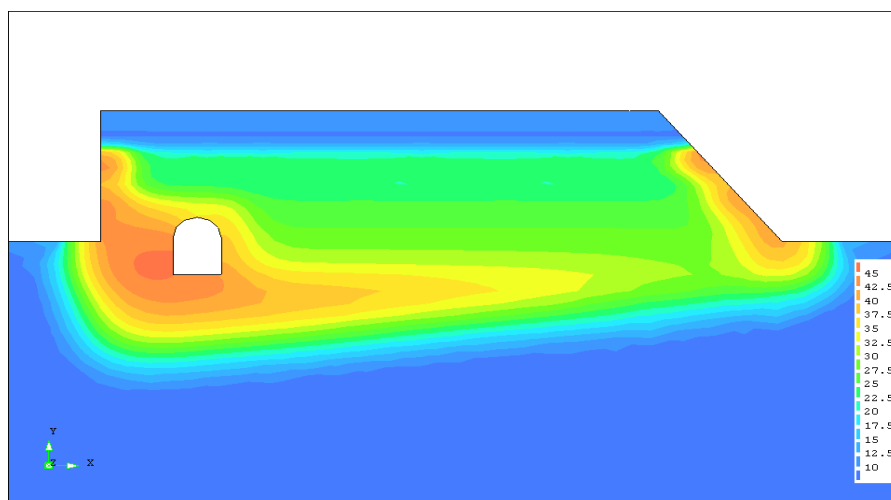


Fig.A2.2- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 9.

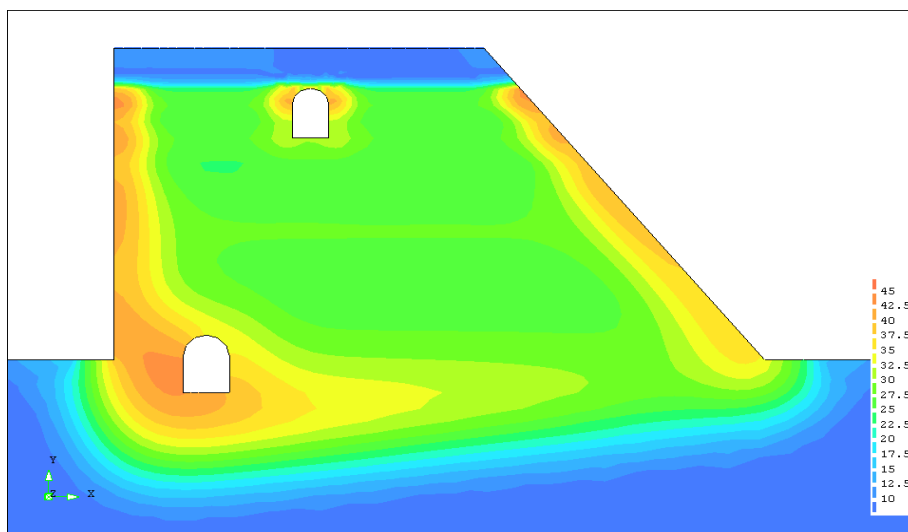


Fig.A2.3- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 15.

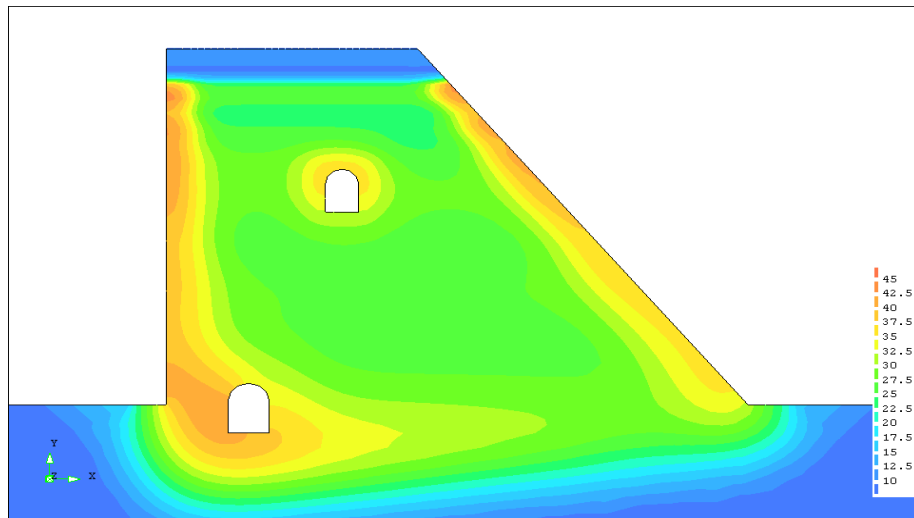


Fig.A2.4- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 18.

2º CENÁRIO

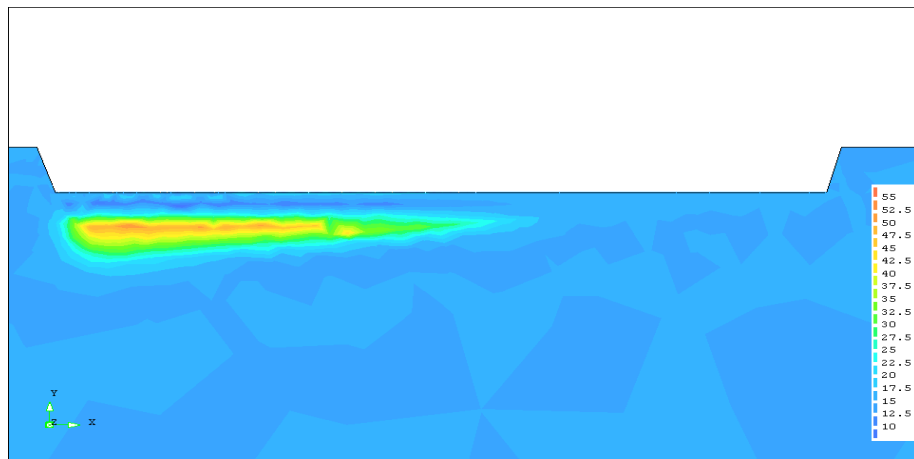


Fig.A2.5- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 3.

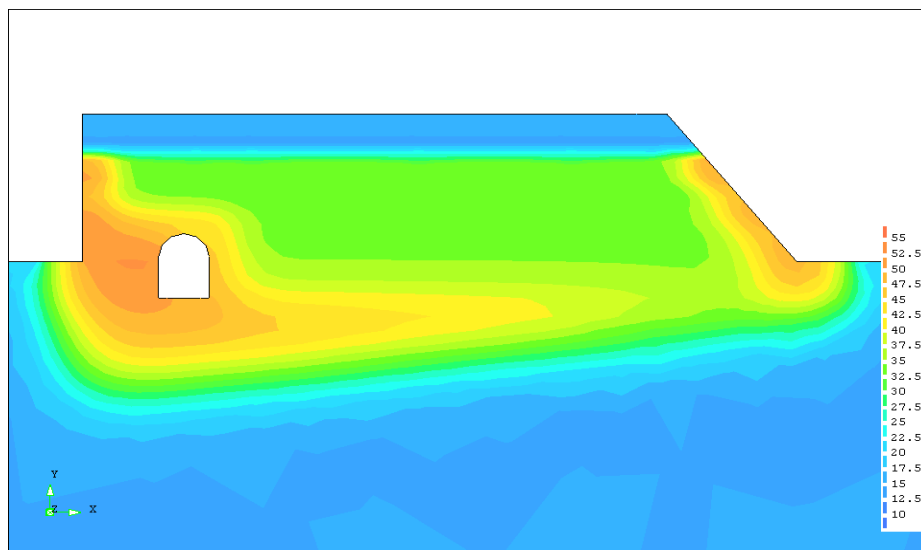


Fig.A2.5- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 9.

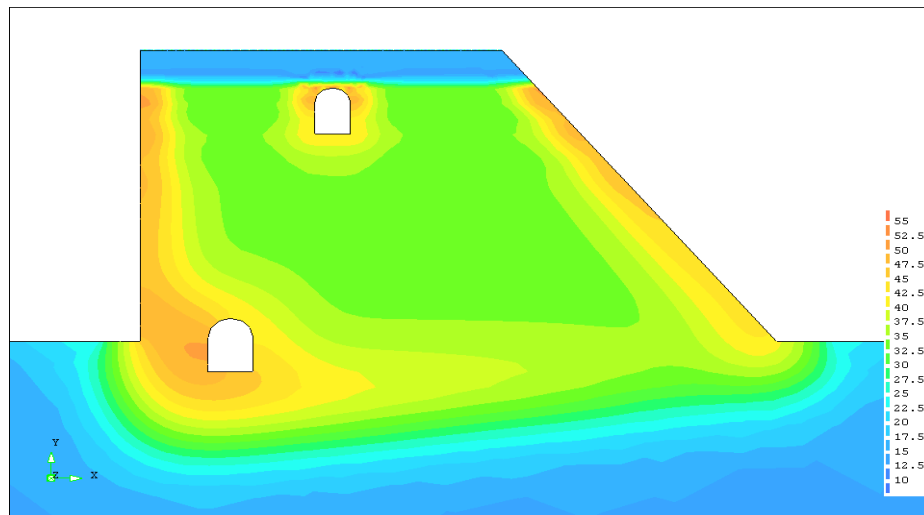


Fig.A2.6- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 15.

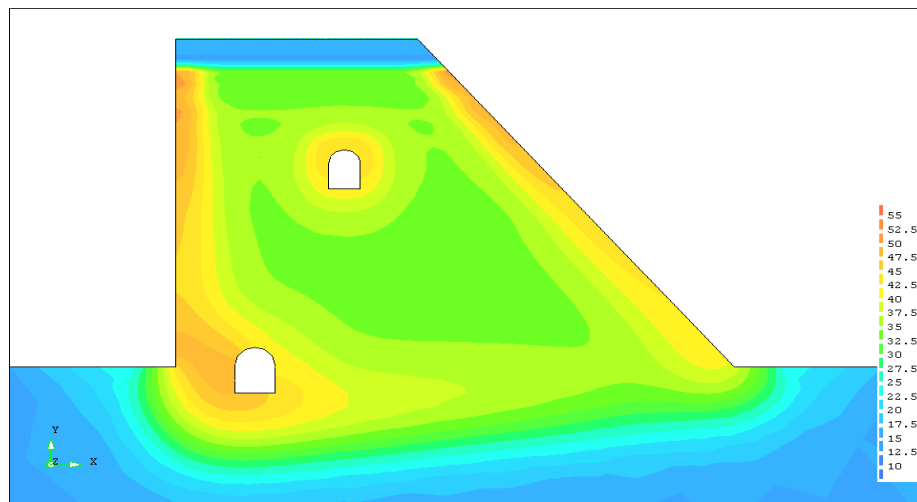


Fig.A2.7- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 18.

3º CENÁRIO

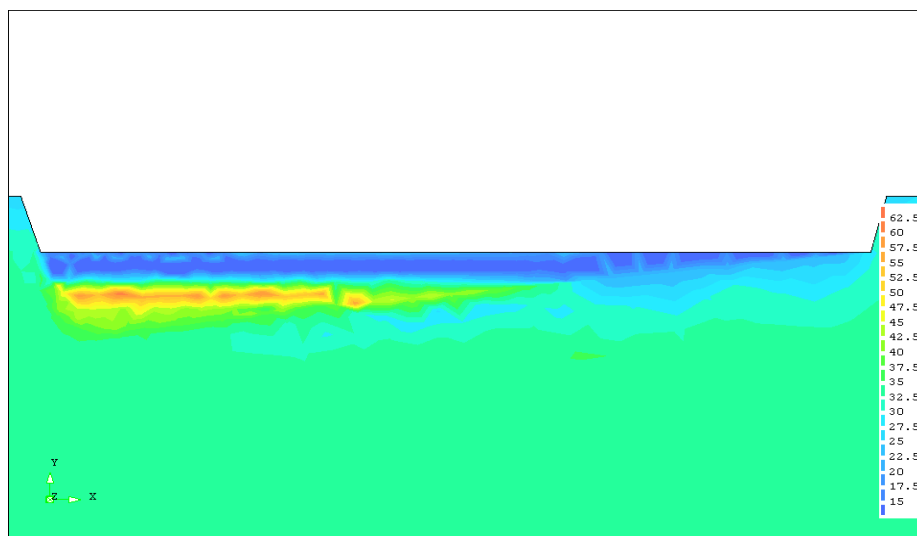


Fig.A2.8- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 3.

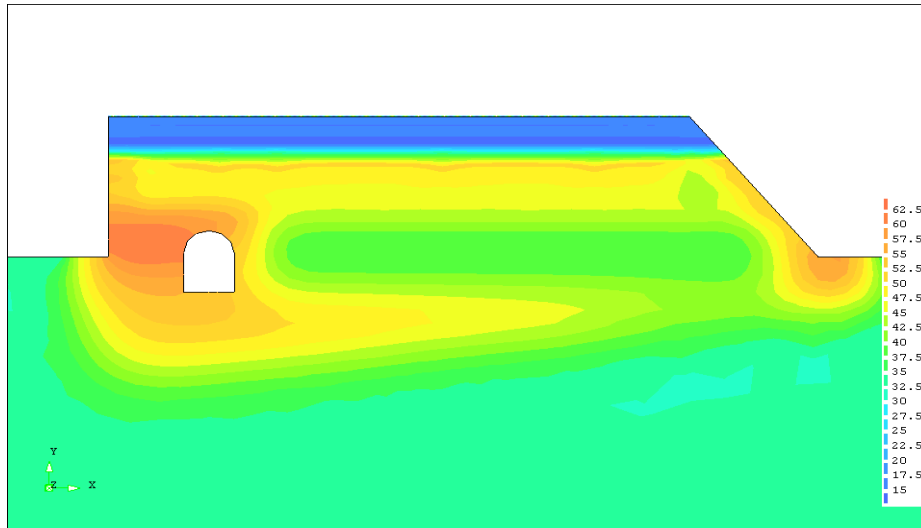


Fig.A2.9- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 9.

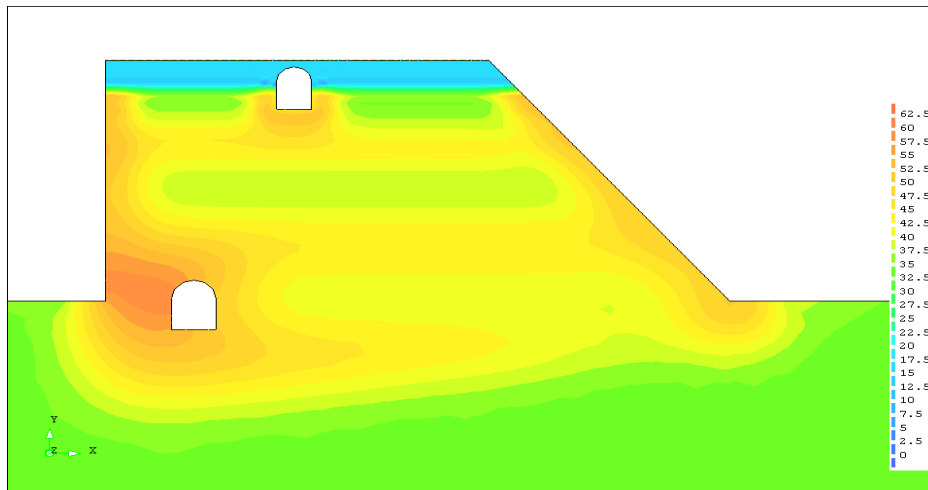


Fig.A2.9- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 15.

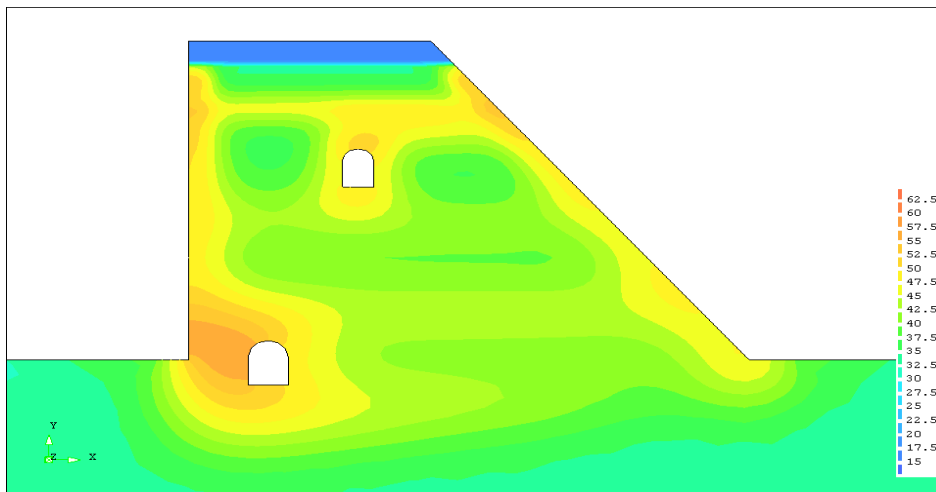


Fig.A2.10- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 18.

4º CENÁRIO

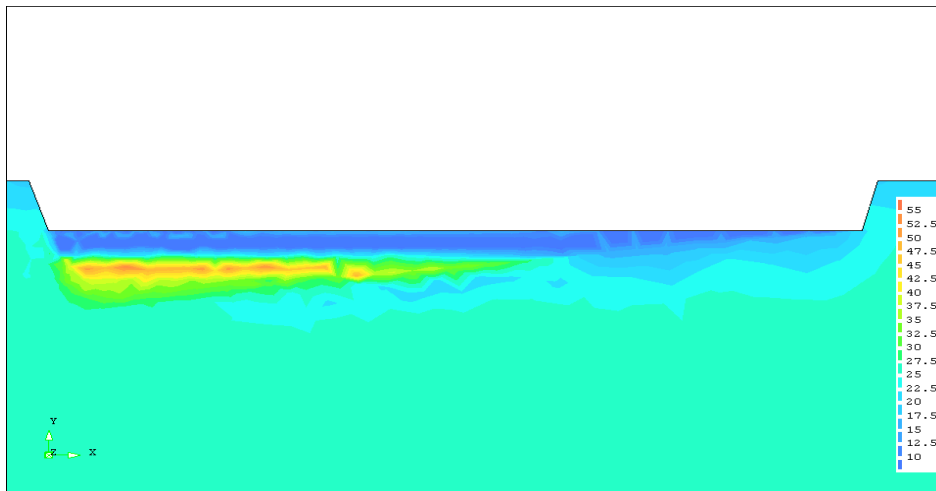


Fig.A2.11- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 3.

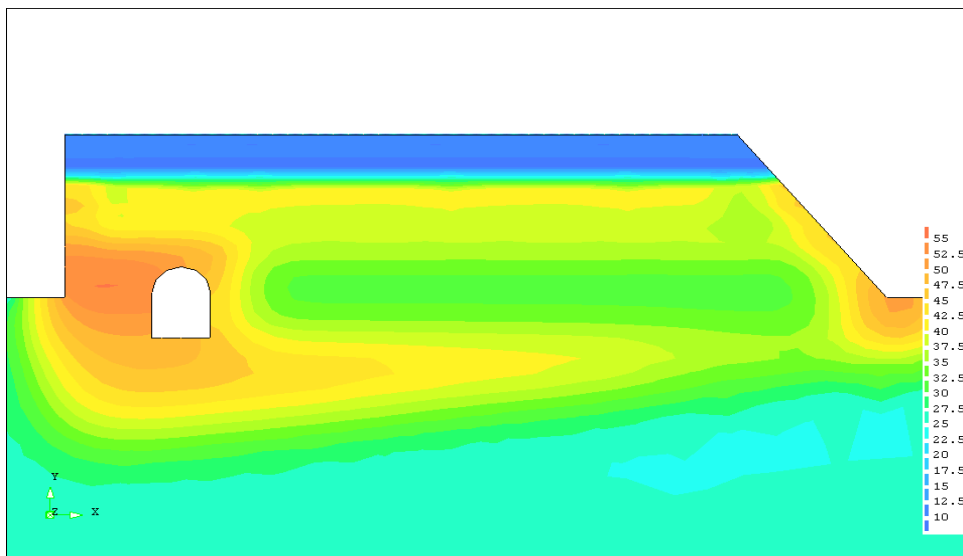


Fig.A2.12- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 9.

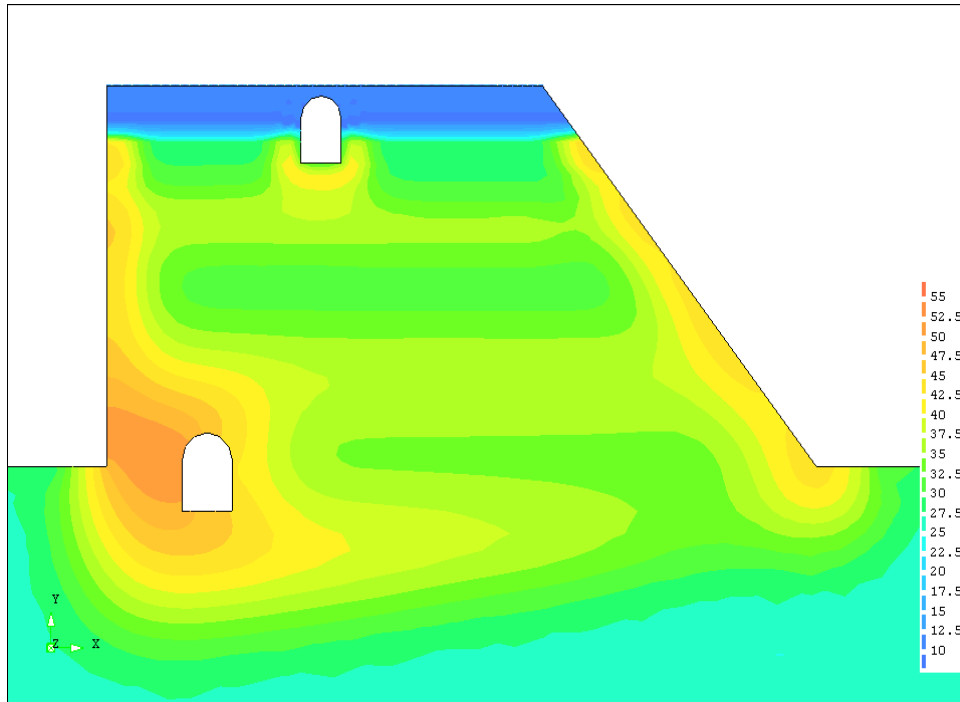


Fig.A2.13- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 15.

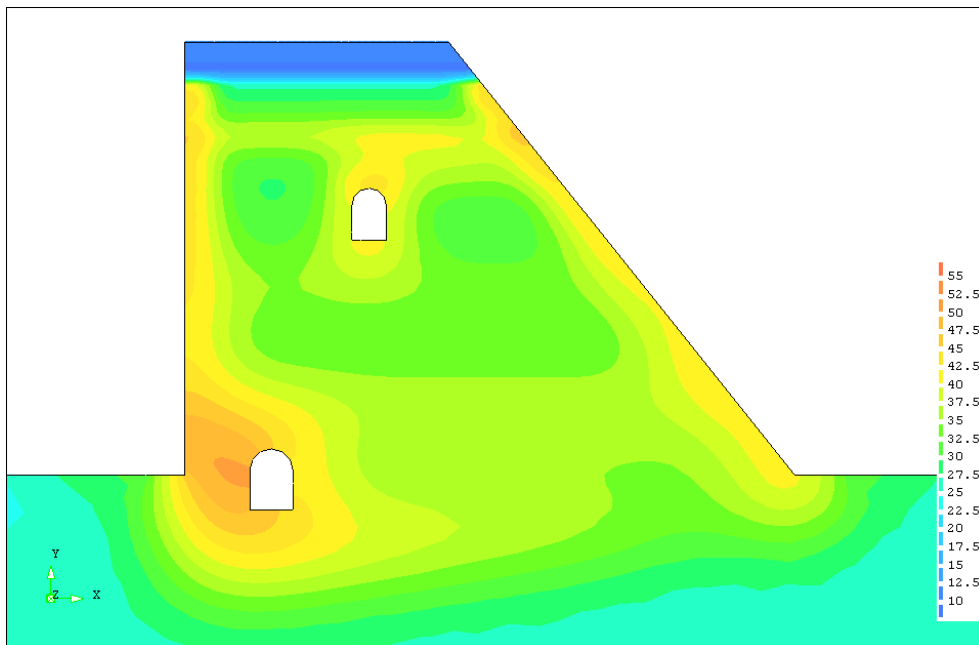


Fig.A2.14- Temperaturas na base da barragem após a betonagem da camada 18.

A.3. MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES NO NÚCLEO DA BARRAGEM (ESCALA DE 0 A 2.6 MPa DE 0.1 EM 0.1 MPa)

1º CENÁRIO

Evolução das tensões em x:



Fig.A3.1- Tensões em x após a betonagem da camada 10.

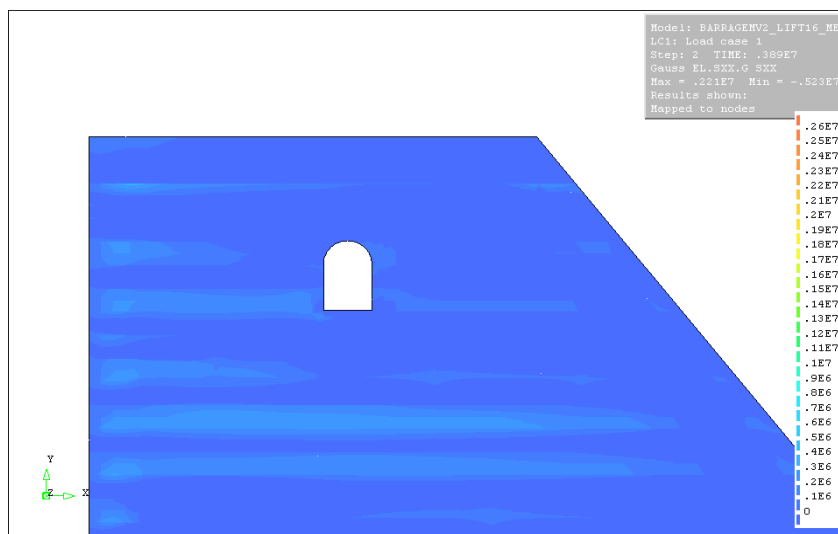


Fig.A3.2- Tensões em x após a betonagem da camada 16.

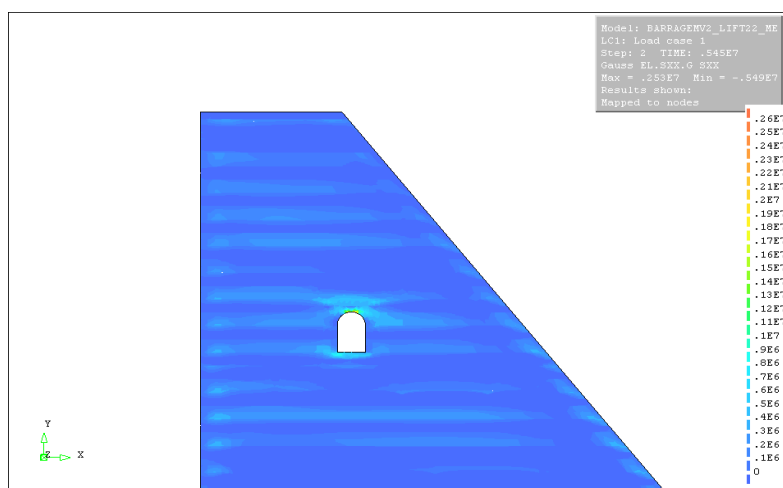


Fig.A3.3- Tensões em x após a betonagem da camada 22.

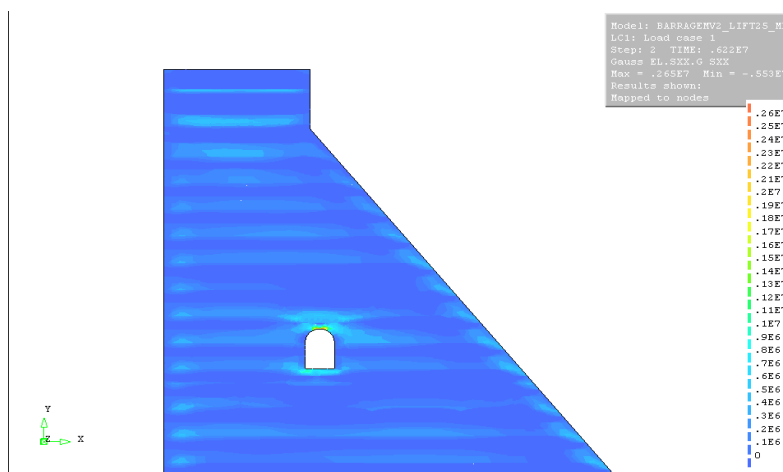


Fig.A3.4- Tensões em x após a betonagem da camada 25.

Evolução das tensões em z:

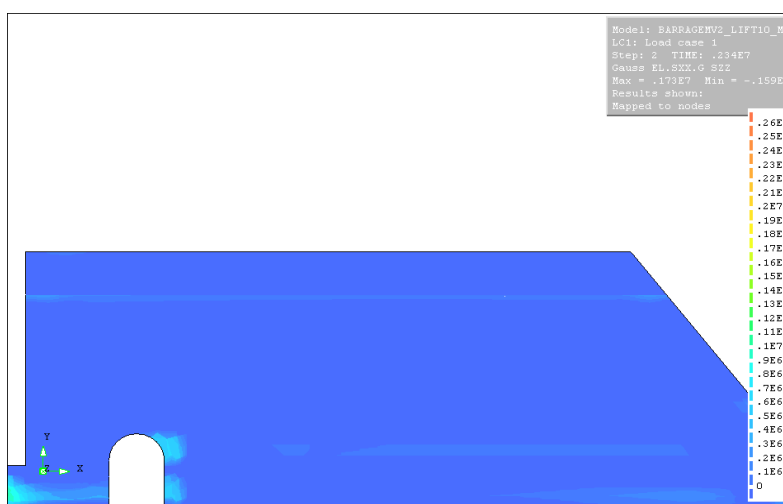


Fig.A3.5- Tensões em z após a betonagem da camada 10.

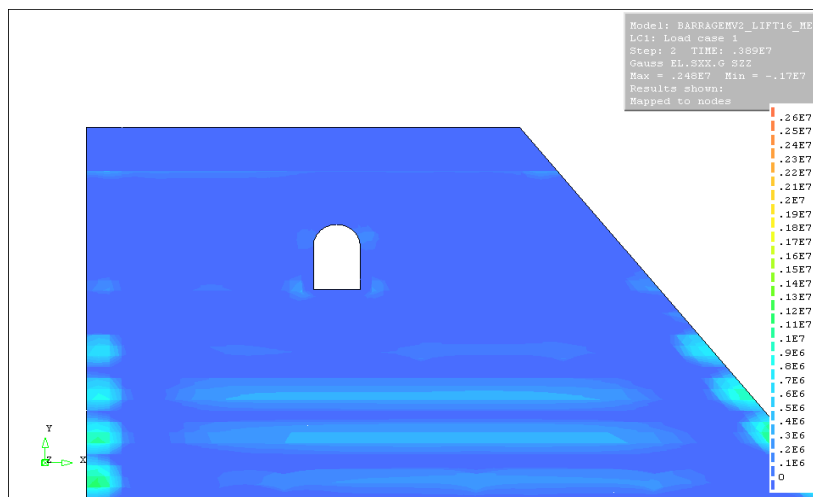


Fig.A3.6- Tensões em z após a betonagem da camada 16.

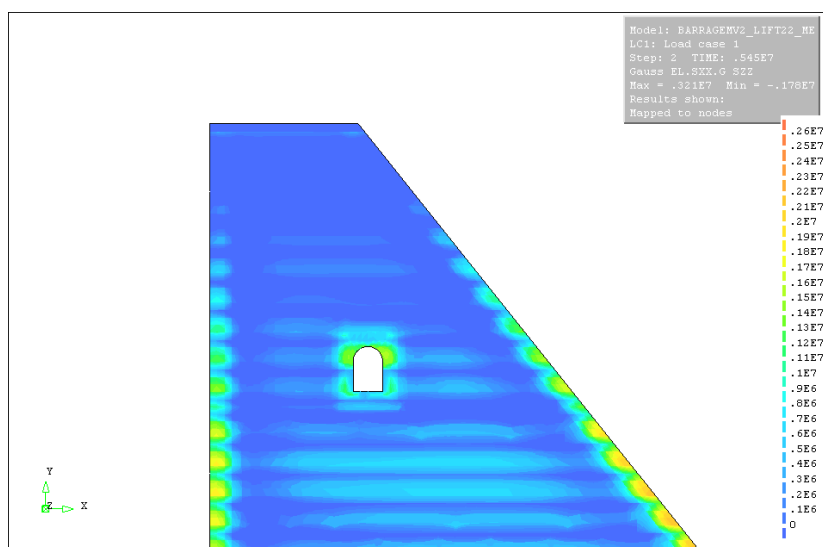


Fig.A3.7- Tensões em z após a betonagem da camada 22.

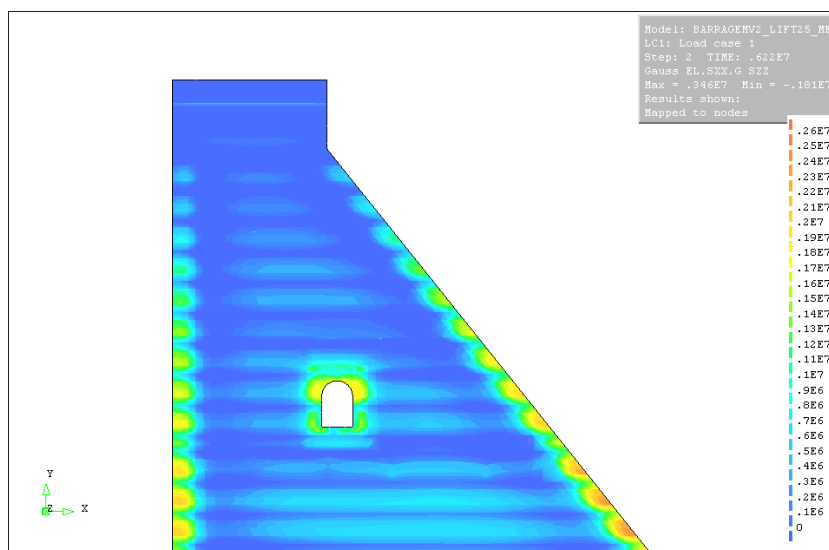


Fig.A3.8- Tensões em z após a betonagem da camada 25.

2º CENÁRIO

Evolução das tensões em x:



Fig.A3.9- Tensões em x após a betonagem da camada 10.

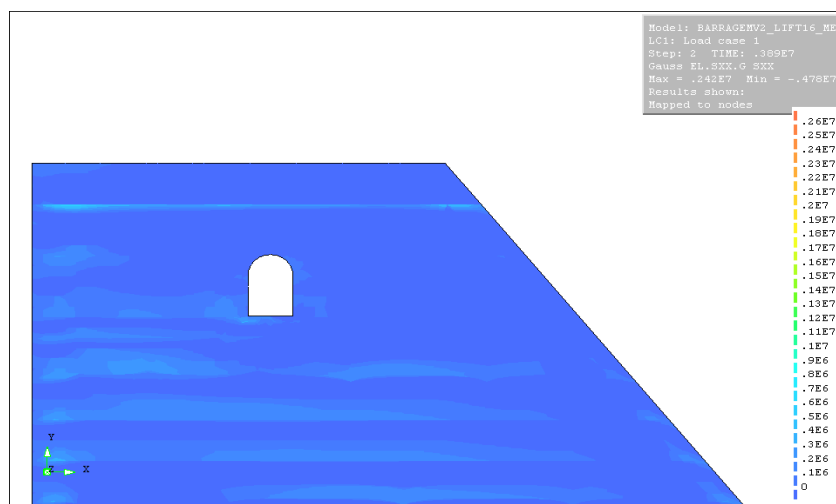


Fig.A3.10- Tensões em x após a betonagem da camada 16.

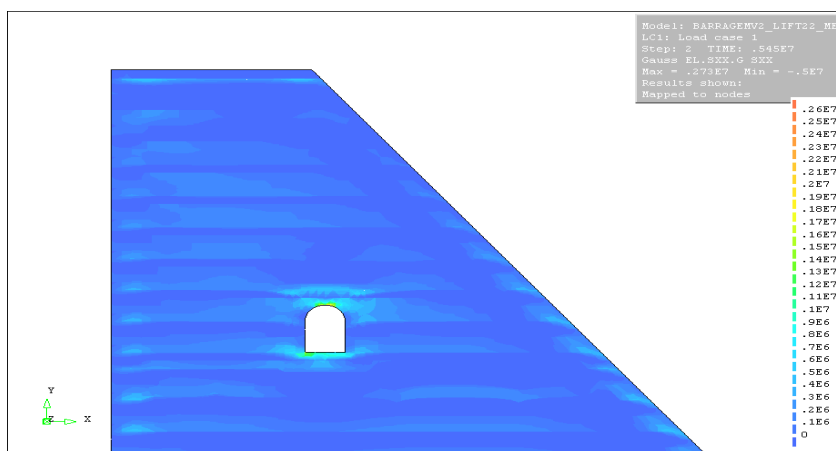


Fig.A3.11- Tensões em x após a betonagem da camada 22.

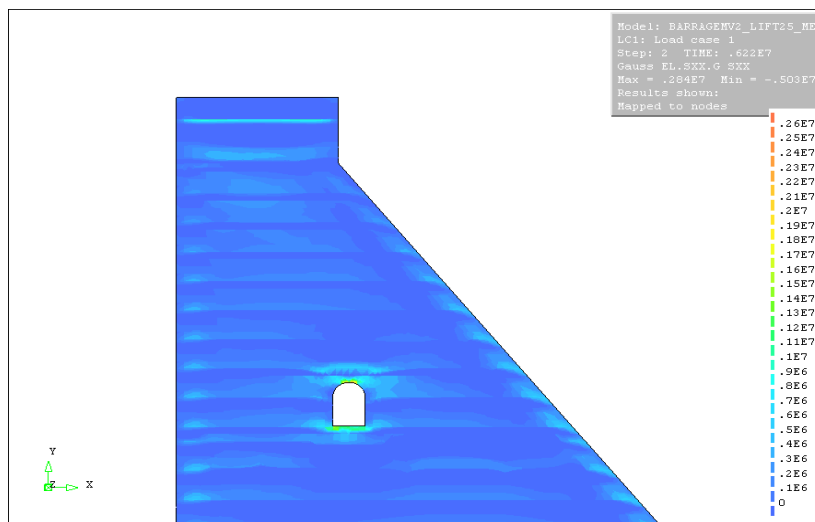


Fig.A3.12- Tensões em x após a betonagem da camada 25.

Evolução das tensões em z:



Fig.A3.13- Tensões em z após a betonagem da camada 10.

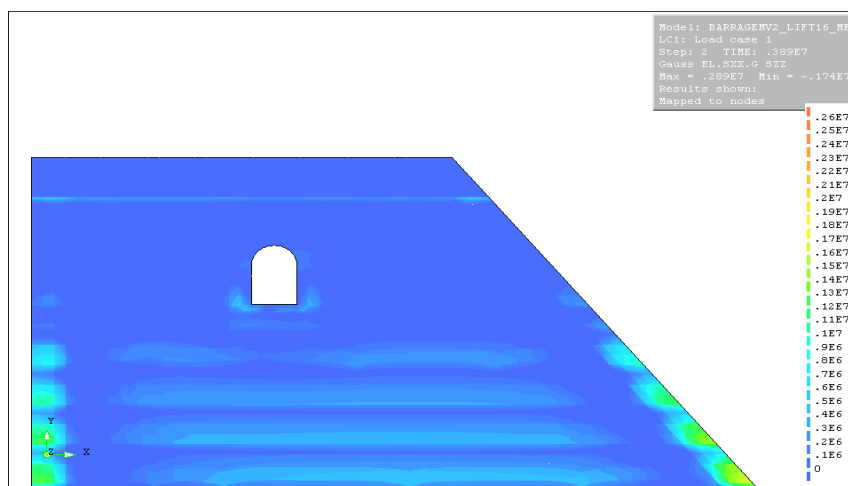


Fig.A3.14- Tensões em z após a betonagem da camada 16.

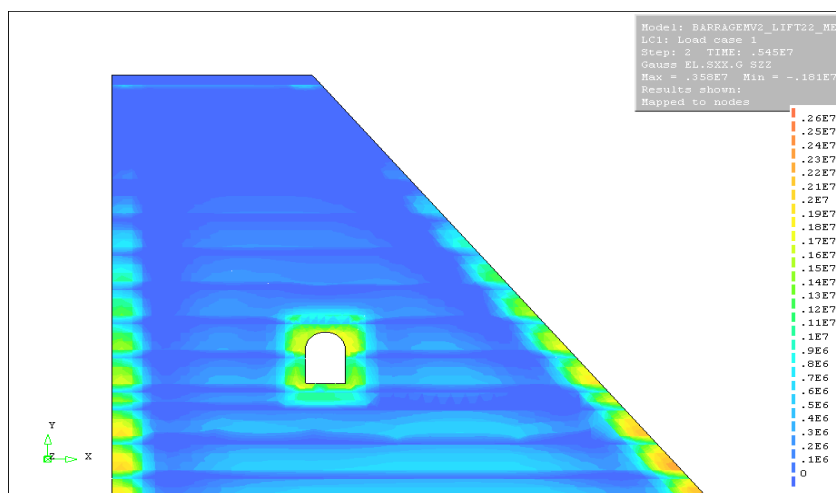


Fig.A3.15- Tensões em z após a betonagem da camada 22.

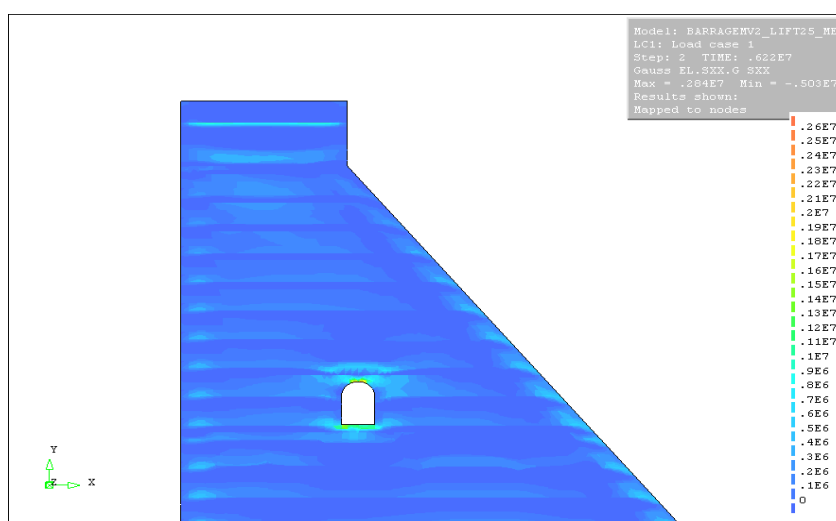


Fig.A3.16- Tensões em z após a betonagem da camada 25.

3º CENÁRIO

Evolução das tensões em x:



Fig.A3.17- Tensões em x após a betonagem da camada 10.

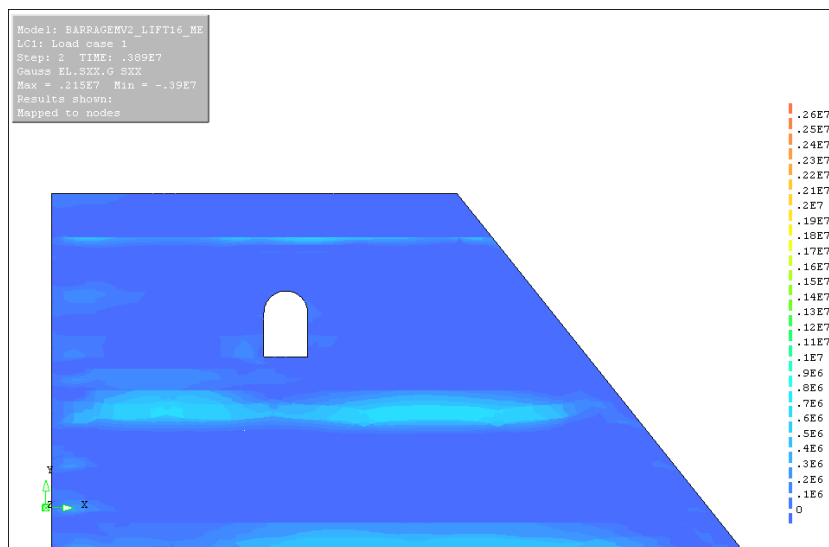


Fig.A3.18- Tensões em x após a betonagem da camada 16.

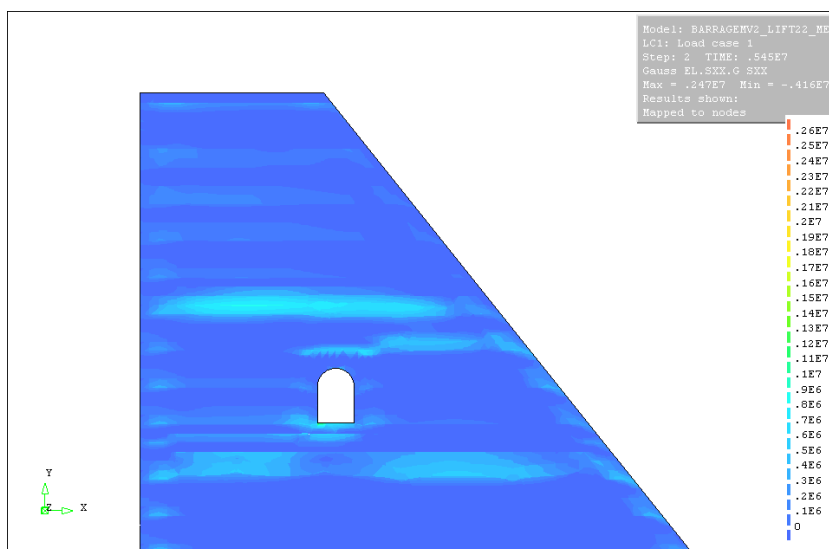


Fig.A3.19- Tensões em x após a betonagem da camada 22.

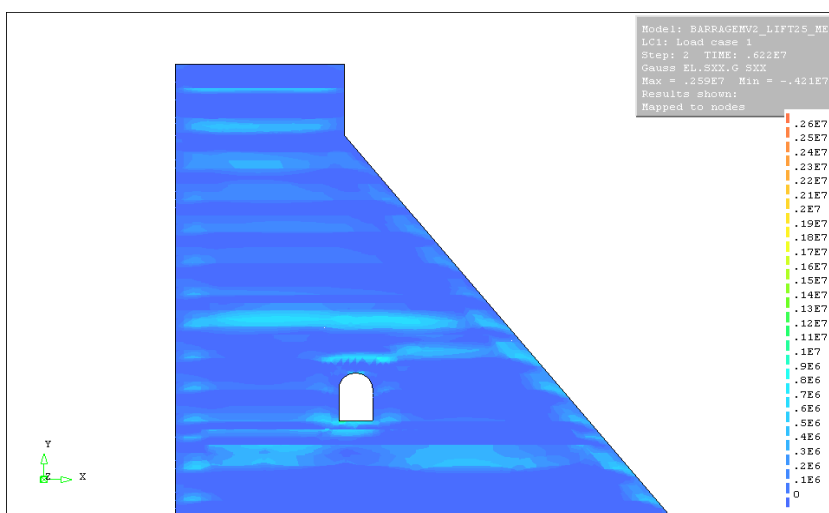


Fig.A3.20- Tensões em x após a betonagem da camada 25.

Evolução das tensões em z:

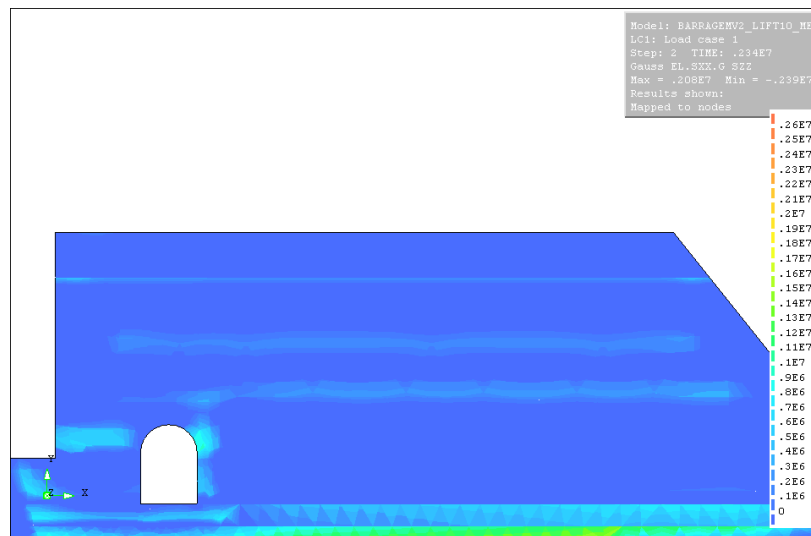


Fig.A3.21- Tensões em z após a betonagem da camada 10.

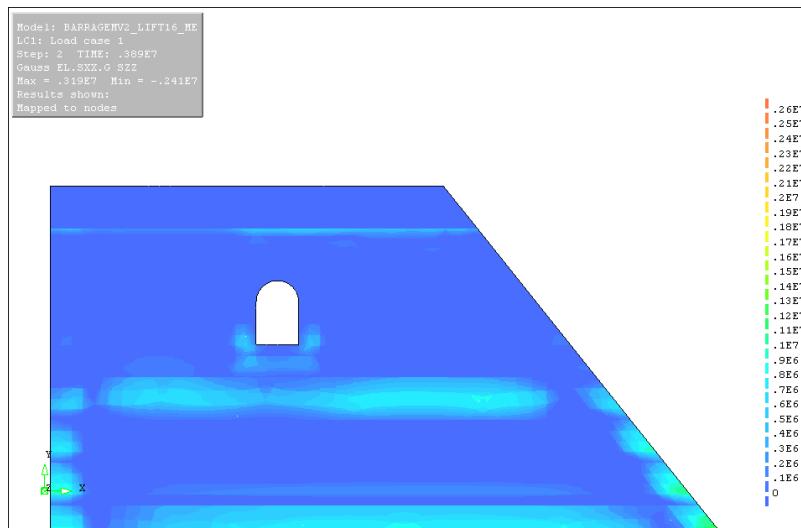


Fig.A3.22- Tensões em z após a betonagem da camada 16.

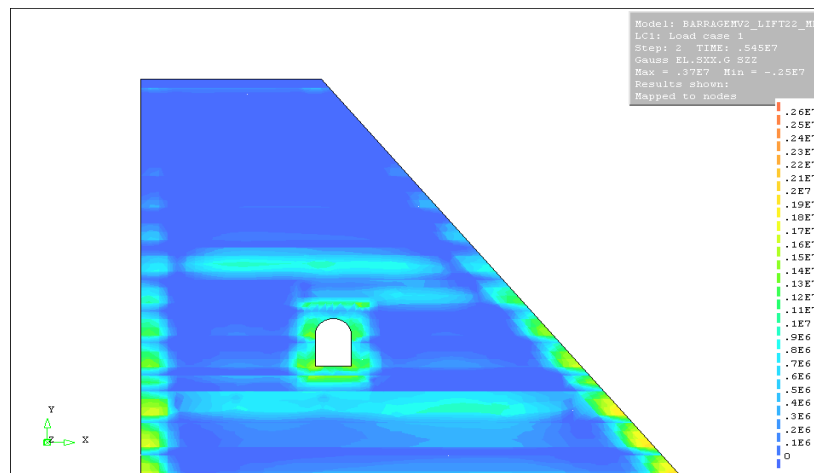


Fig.A3.23- Tensões em z após a betonagem da camada 22.

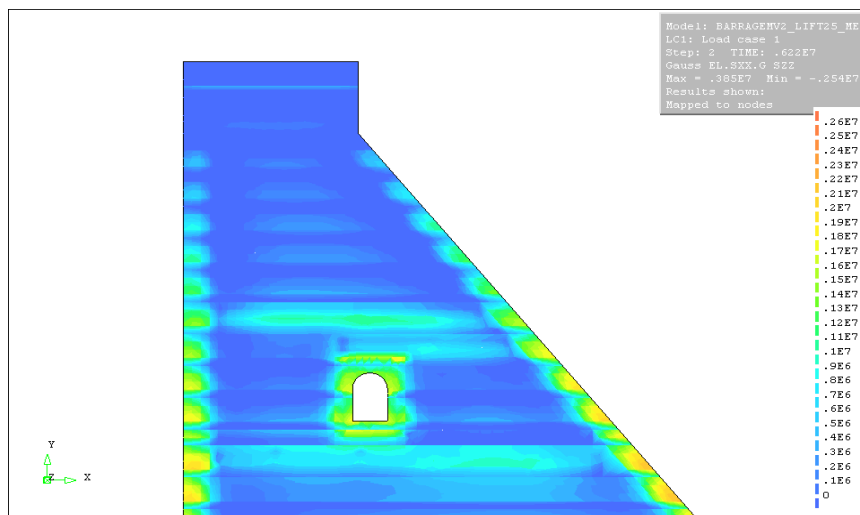


Fig.A3.24- Tensões em z após a betonagem da camada 25.

A.4.MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO NÚCLEO DA BARRAGEM

1º CENÁRIO

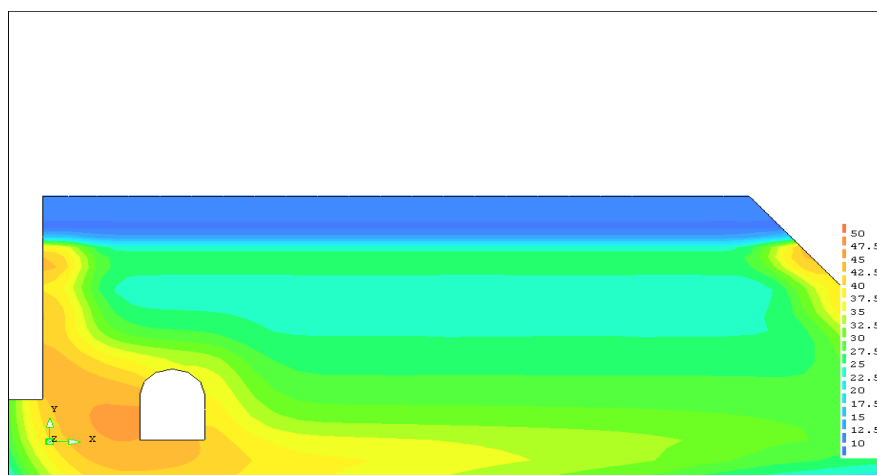


Fig.A4.1- Temperaturas no betão após betonagem da camada 10.

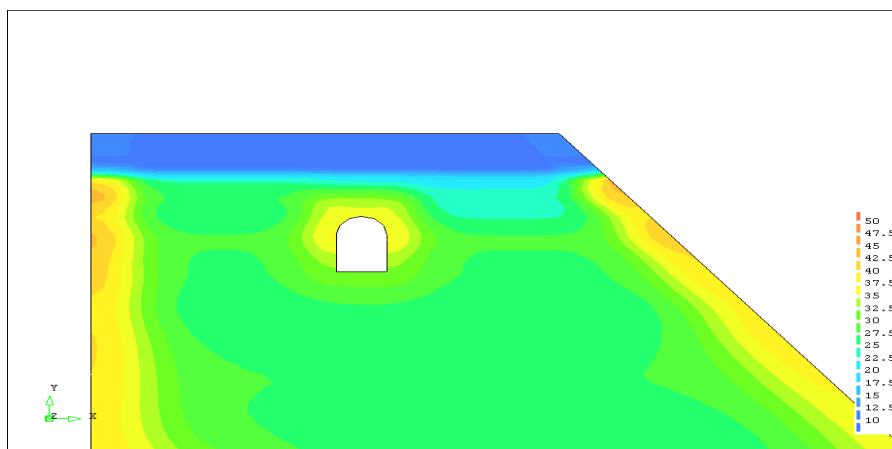


Fig.A4.2- Temperaturas no betão após betonagem da camada 16.

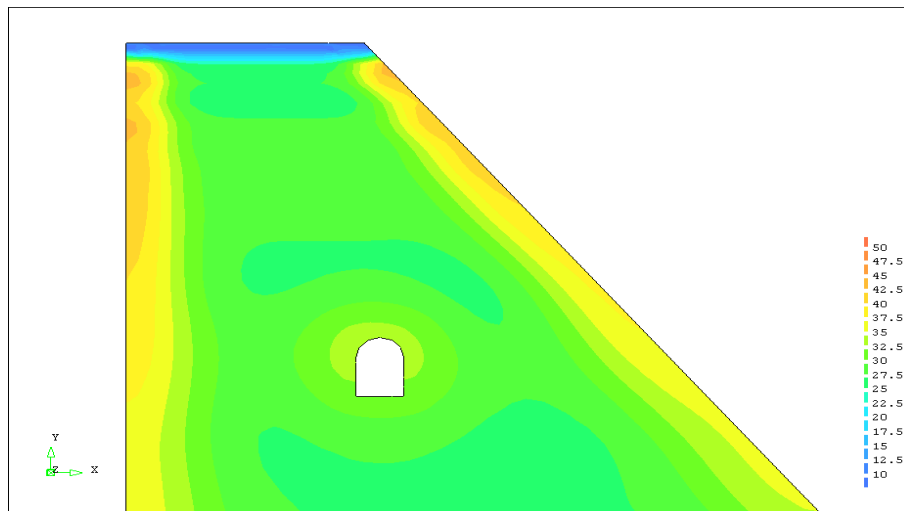


Fig.A4.3- Temperaturas no betão após betonagem da camada 22.



Fig.A4.4- Temperaturas no betão após betonagem da camada 25.

2º CENÁRIO

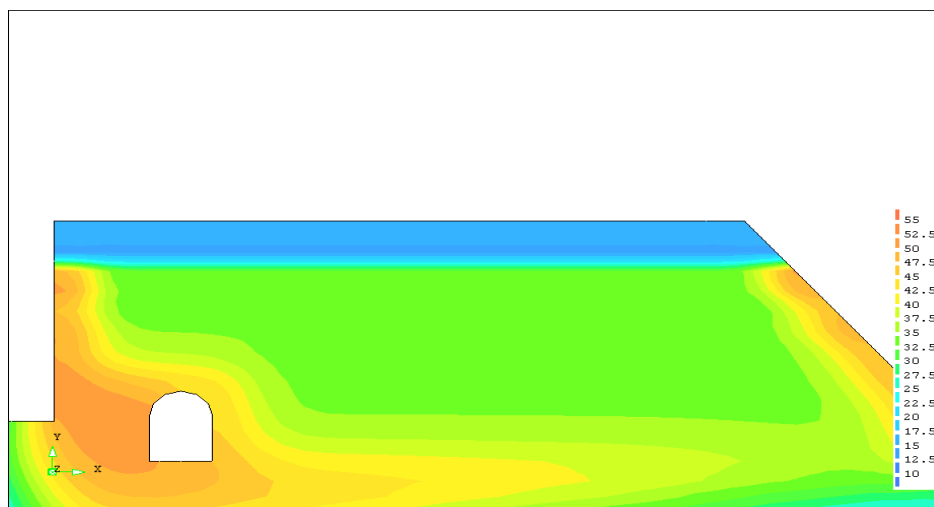


Fig.A4.5- Temperaturas no betão após betonagem da camada 10.

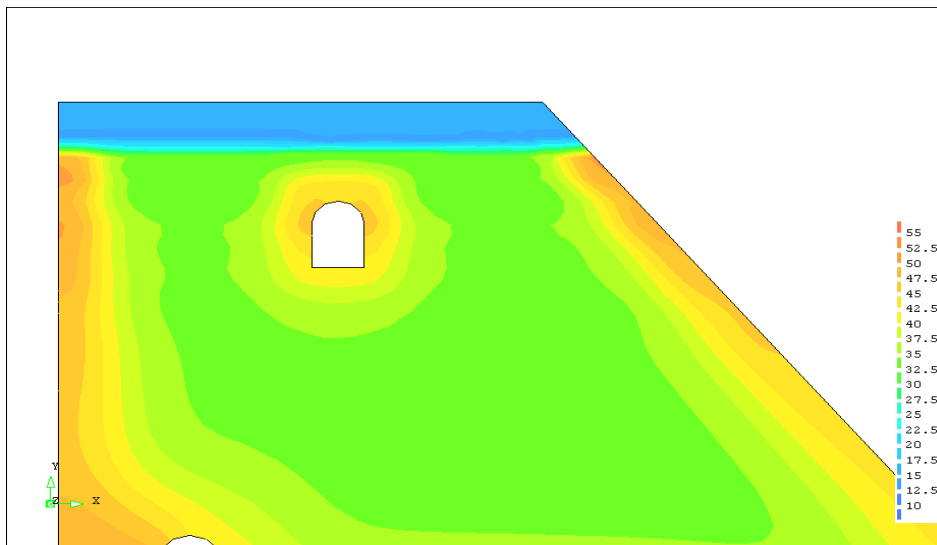


Fig.A4.6- Temperaturas no betão após betonagem da camada 16.

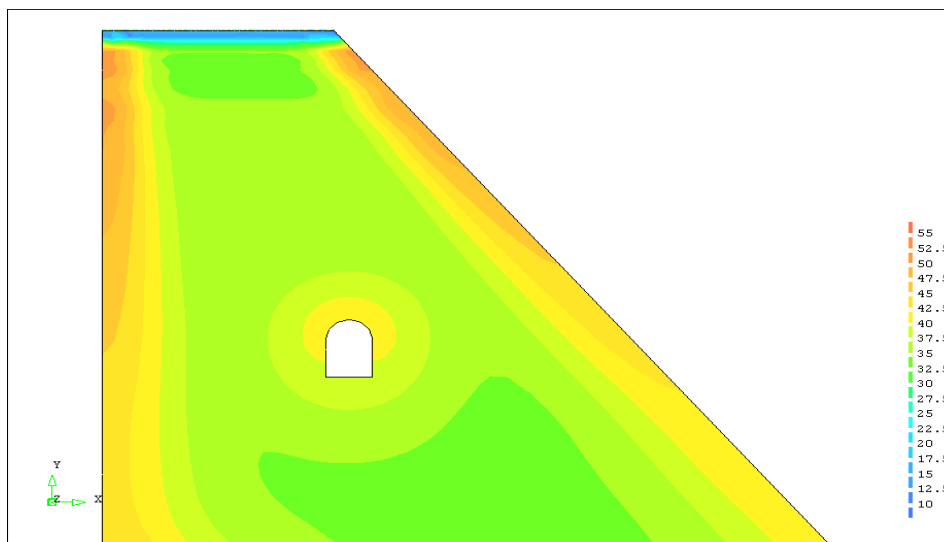


Fig.A4.7- Temperaturas no betão após betonagem da camada 22.

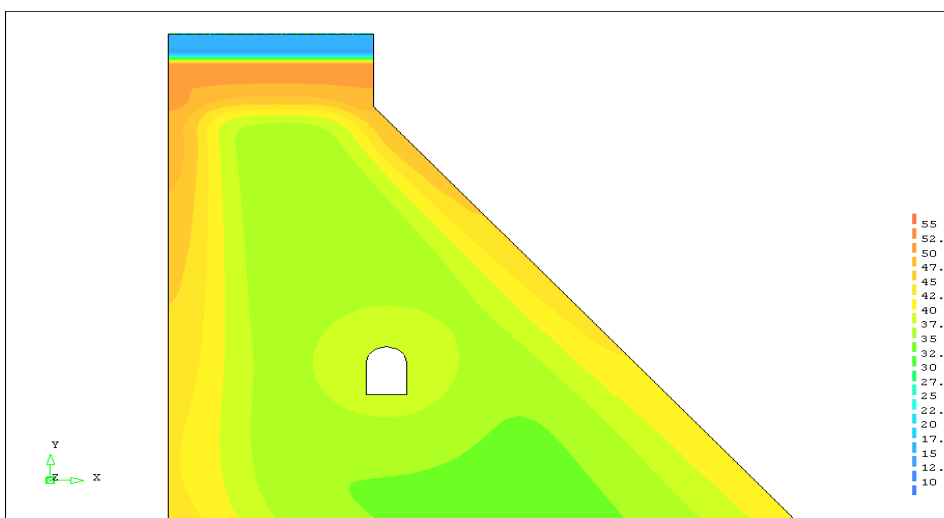


Fig.A4.8- Temperaturas no betão após betonagem da camada 25.

3º CENÁRIO

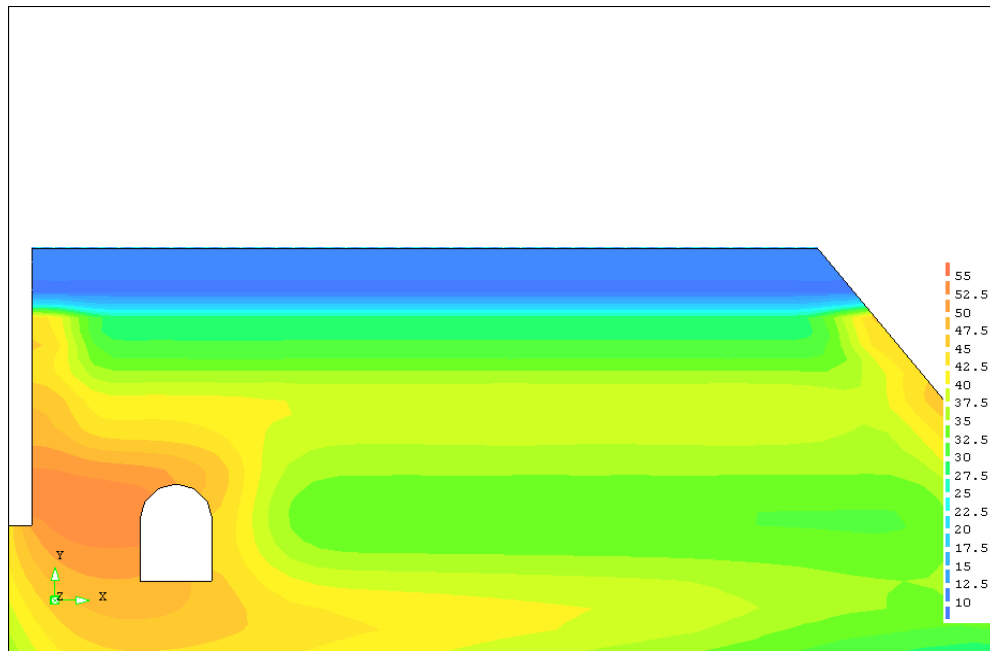


Fig.A4.9- Temperaturas no betão após betonagem da camada 10.

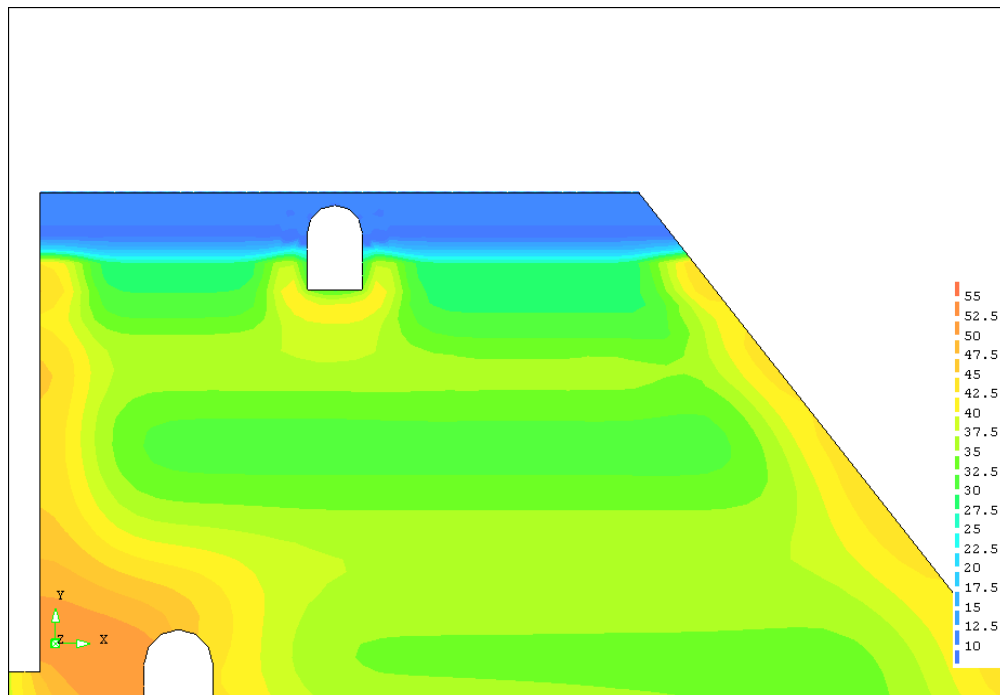


Fig.A4.10- Temperaturas no betão após betonagem da camada 16.

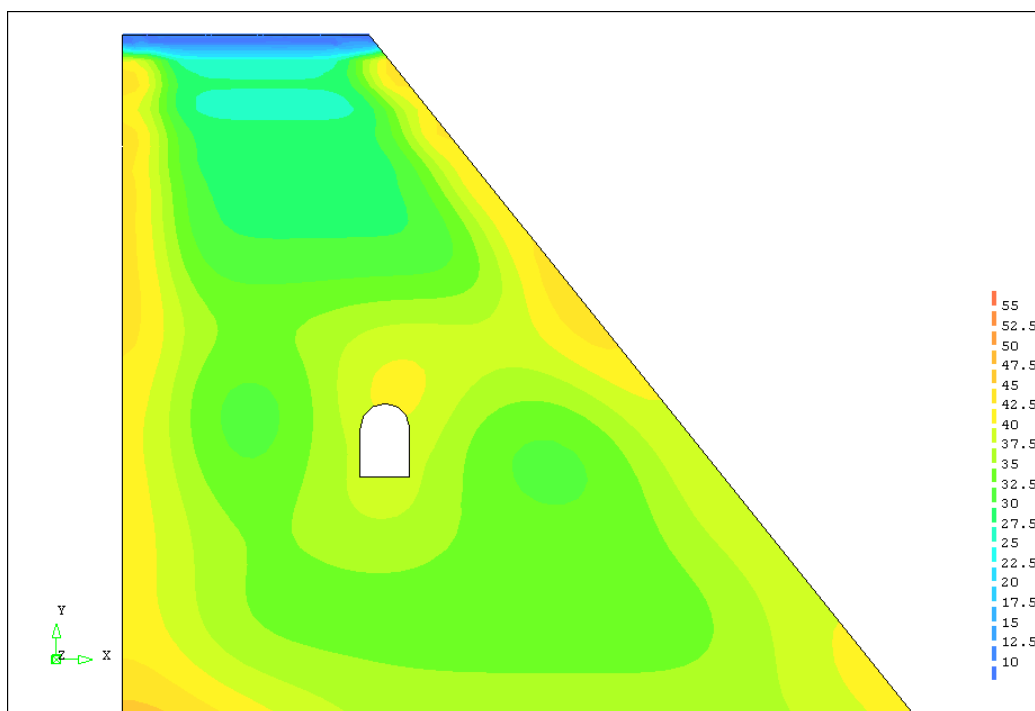


Fig.A4.11- Temperaturas no betão após betonagem da camada 22.

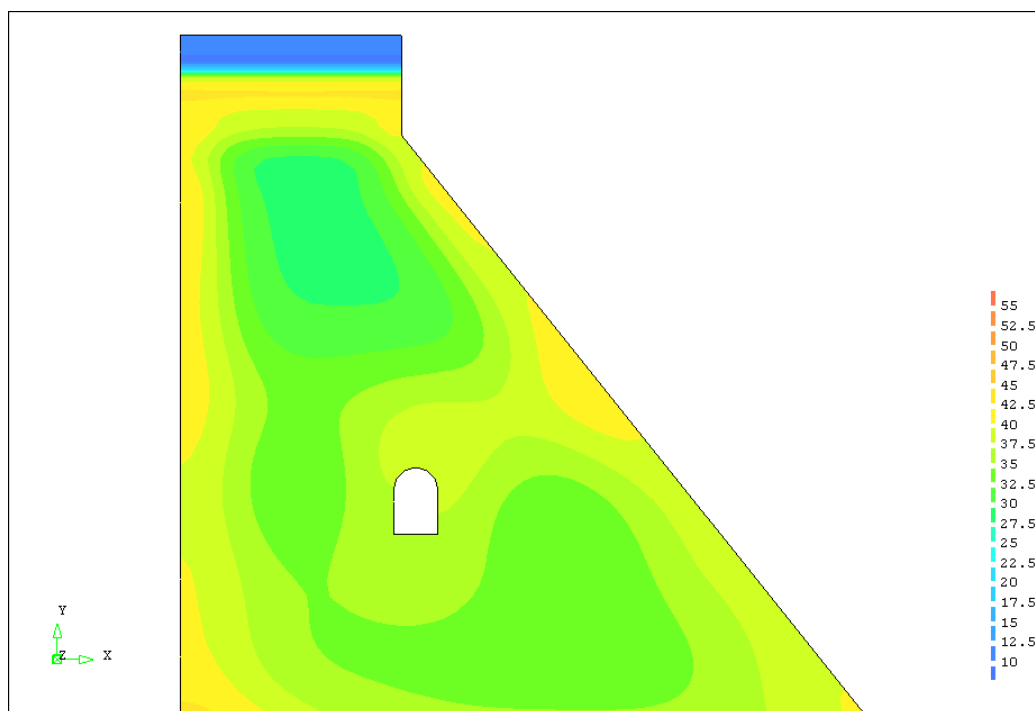
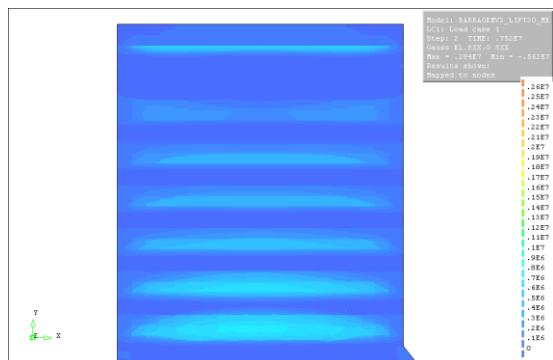


Fig.A4.12- Temperaturas no betão após betonagem da camada 25.

A.5. MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES NO COROAMENTO DA BARRAGEM (ESCALA DE 0 A 2.6 MPa DE 0.1 EM 0.1 MPa)

1ª CENÁRIO: Zona interior e superfície

Evolução das tensões em x para dp11:



Evolução das tensões x para dp12:

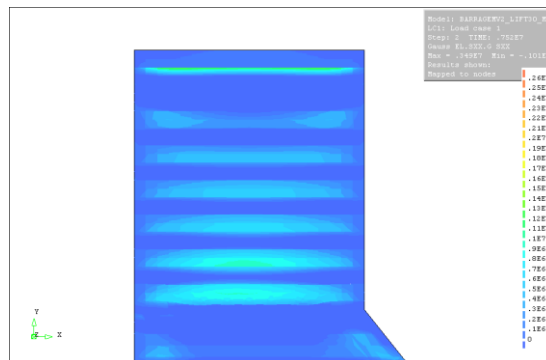


Fig.A5.1- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=1h.

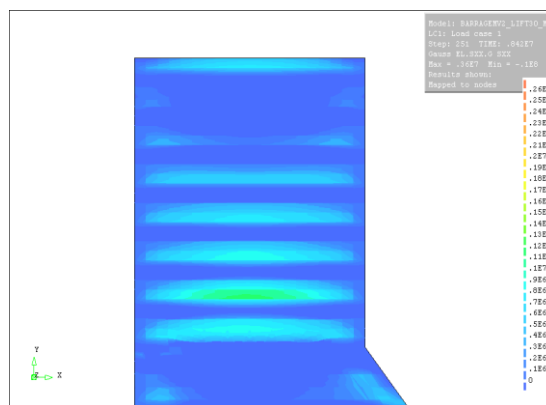
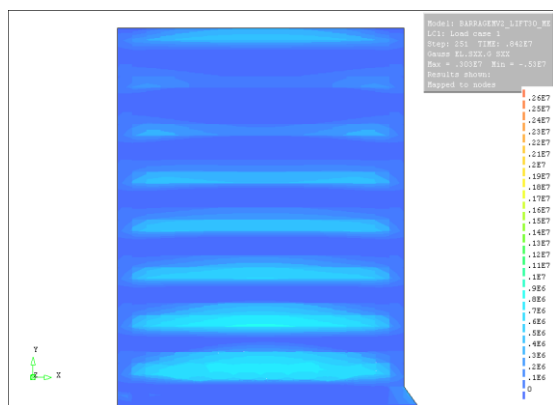


Fig.A5.2- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=250h.

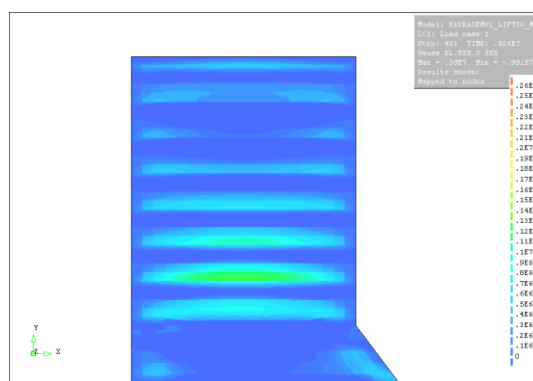
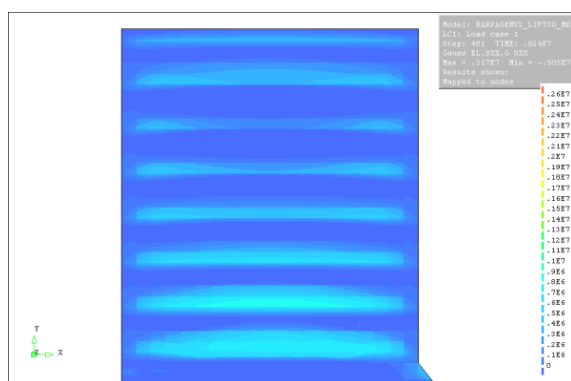
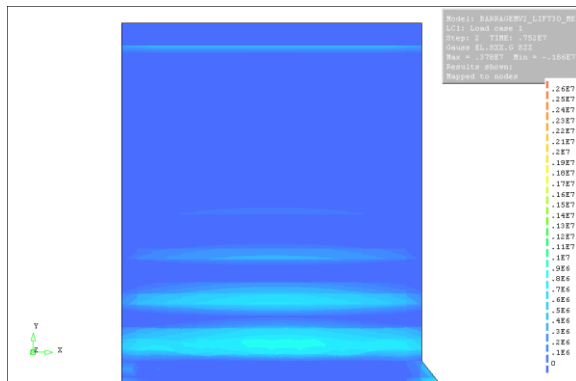


Fig.A5.3- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=480h.

Evolução das tensões em z para dpl1:



Evolução das tensões z para dpl2:

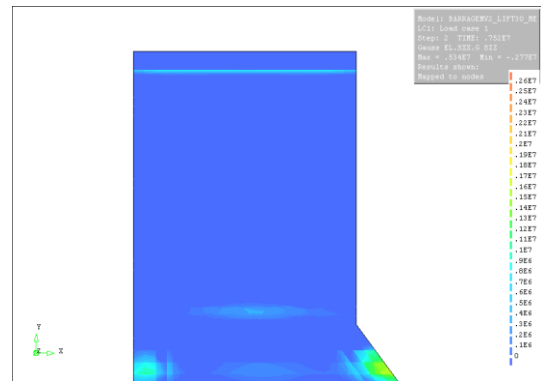


Fig.A5.4- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=1h.

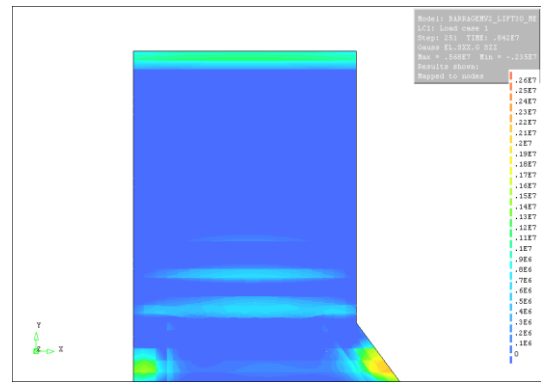
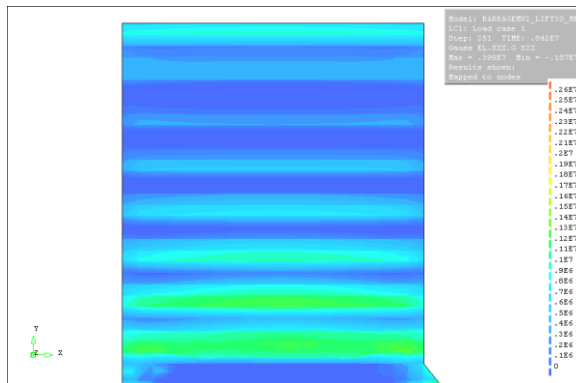


Fig.A5.5- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=250h.

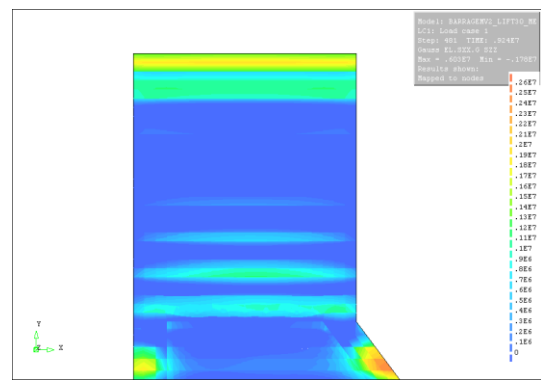
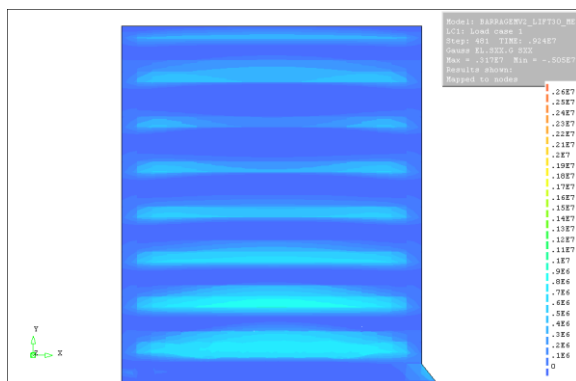
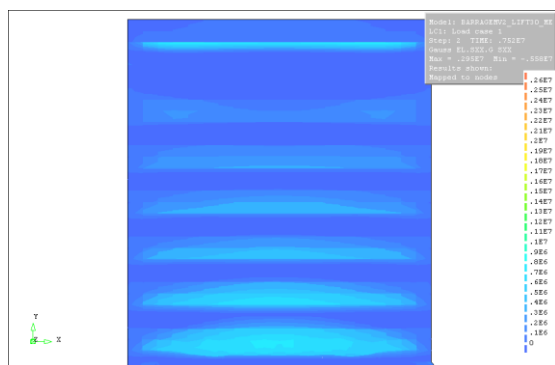


Fig.A5.6- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=480h.

2º CENÁRIO: Zona interior e superfície

Evolução das tensões em x para dp11:



Evolução das tensões x para dp12:

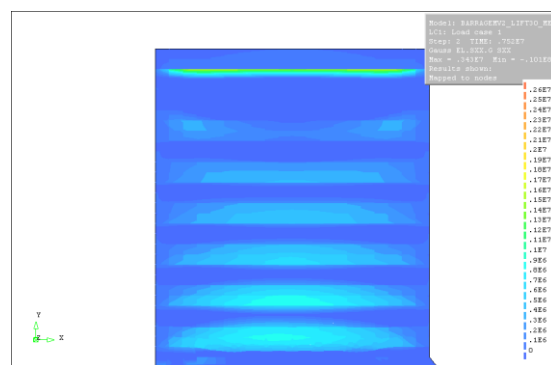


Fig.A5.7- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=1h.

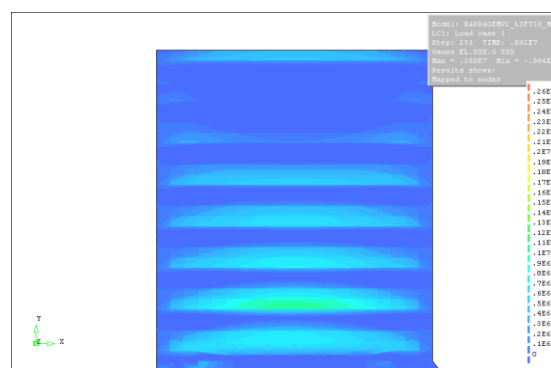
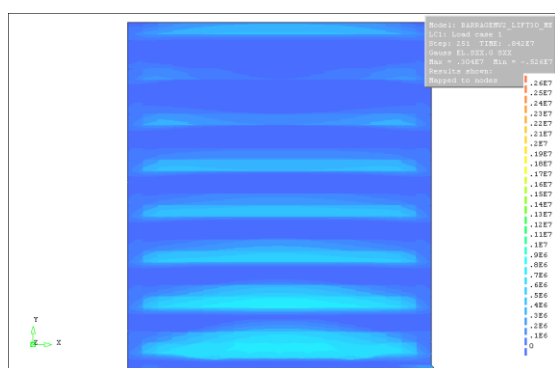


Fig.A5.8- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=250h.

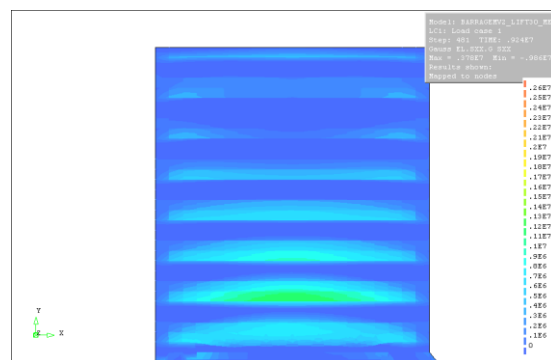
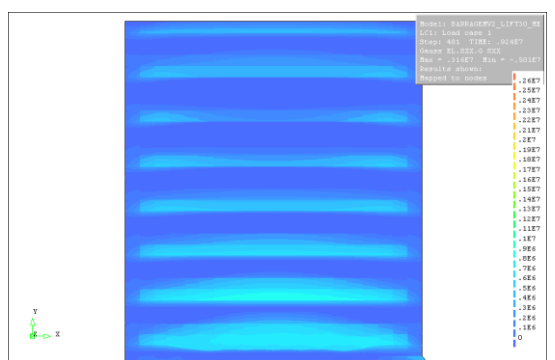
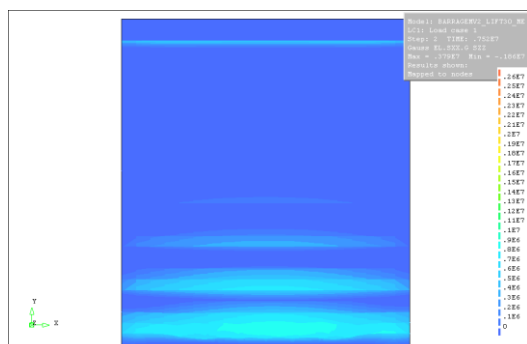


Fig.A5.9- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=480h.

Evolução das tensões em z para dp11:



Evolução das tensões z para dp12:

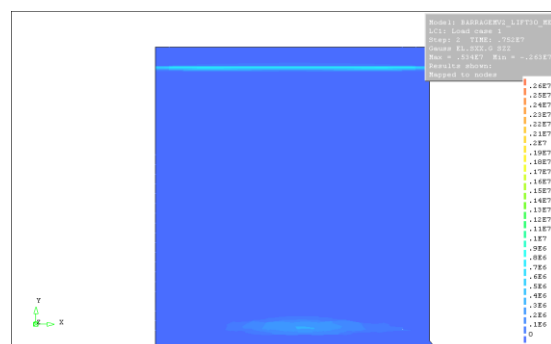


Fig.A5.10- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=1h.

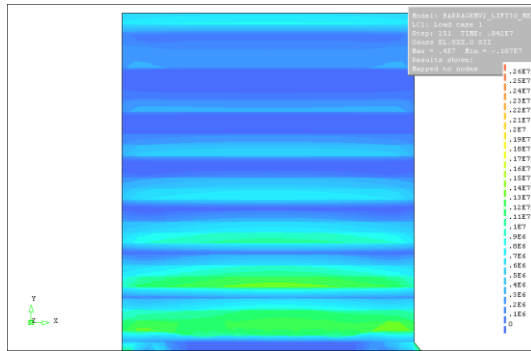


Fig.A5.11- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=250h.

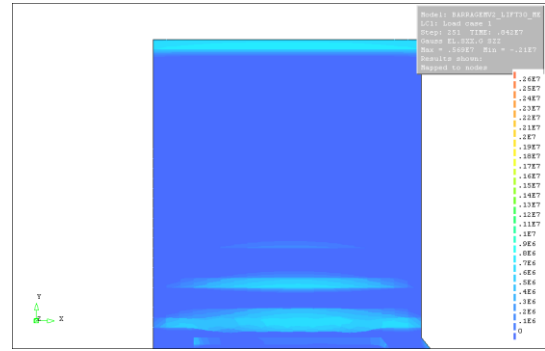


Fig.A5.12- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=480h.

3º CENÁRIO: Zona interior e superfície

Evolução das tensões em x para dp11:

Evolução das tensões x para dp12:

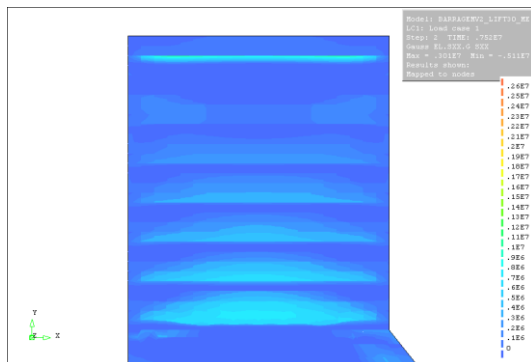


Fig.A5.13- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=1h.

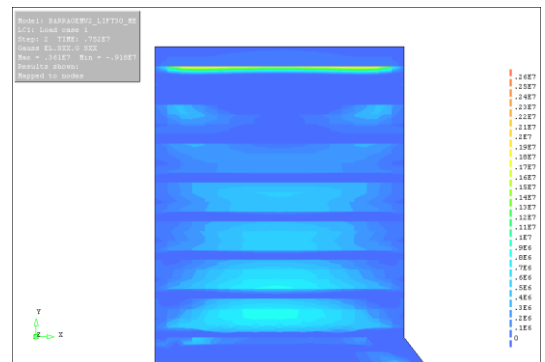


Fig.A5.14- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=250h.

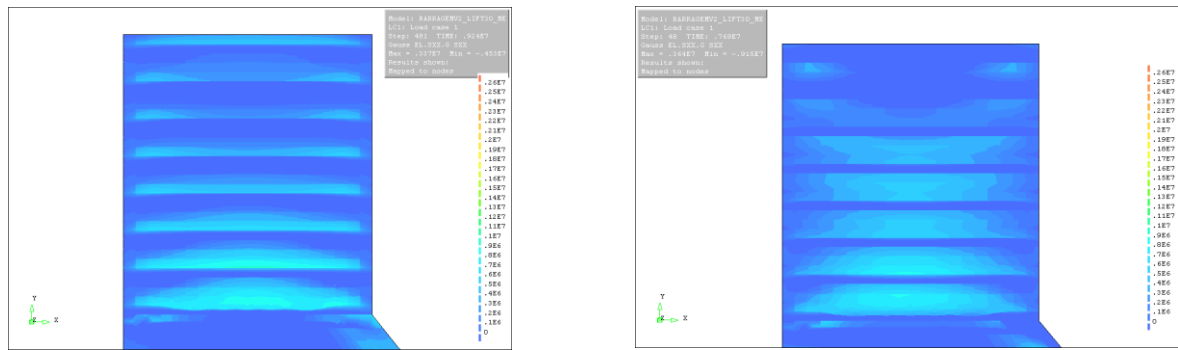
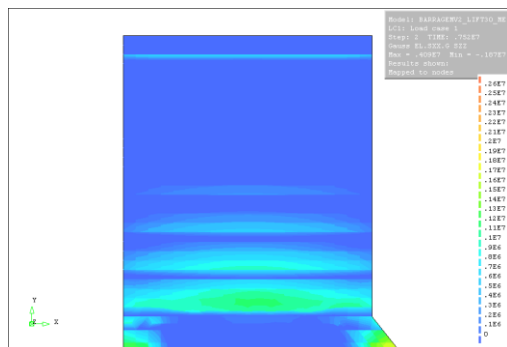


Fig.A5.15- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=480h.

Evolução das tensões em z para dpl1:



Evolução das tensões z para dpl2:

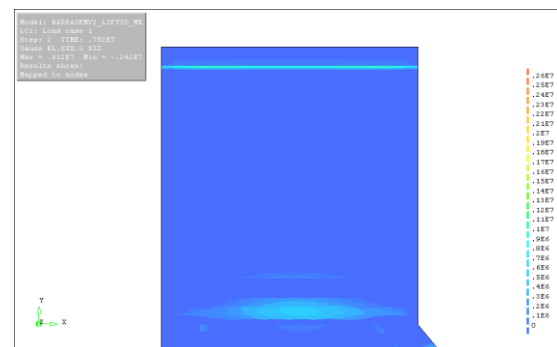


Fig.A5.16- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=1h.

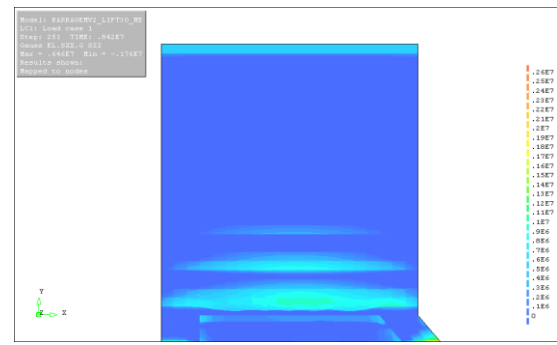
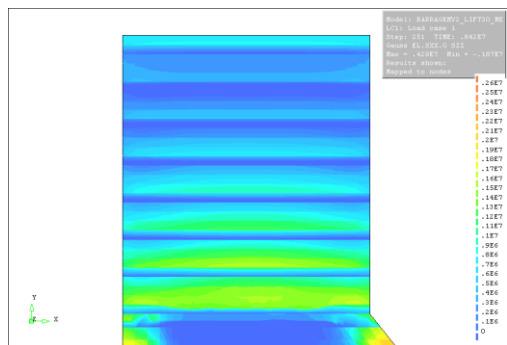


Fig.A5.17- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=250h.

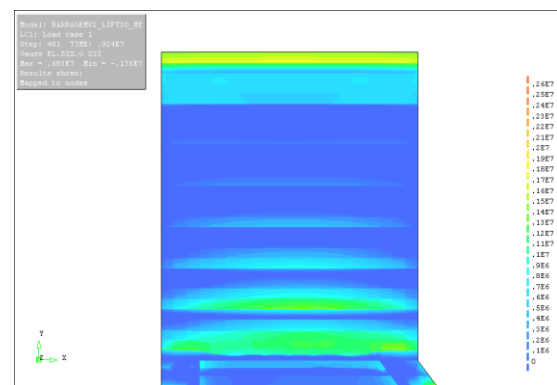
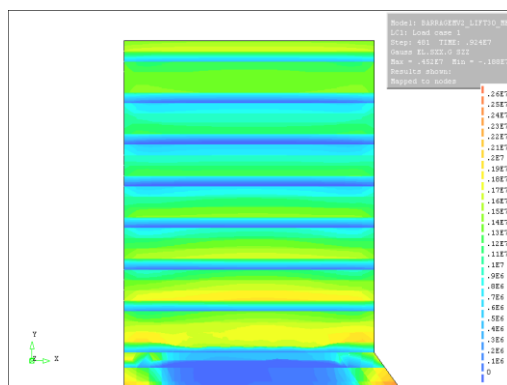


Fig.A5.18- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=480h.

4ª CENÁRIO: Zona interior e superfície

Evolução das tensões em x para dpl1:

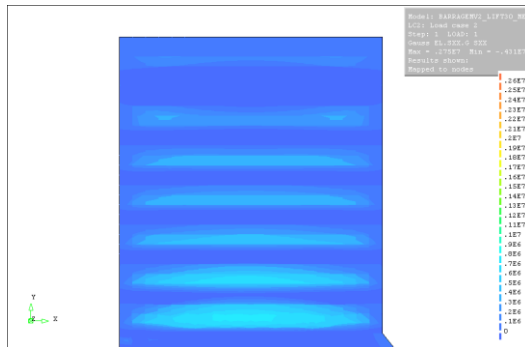


Fig.A5.19- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=1h.

Evolução das tensões x para dpl2:

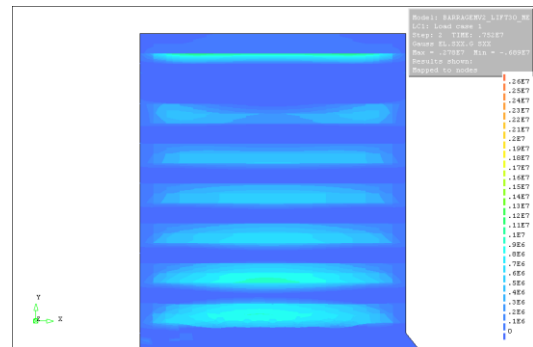


Fig.A5.20- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=250h.

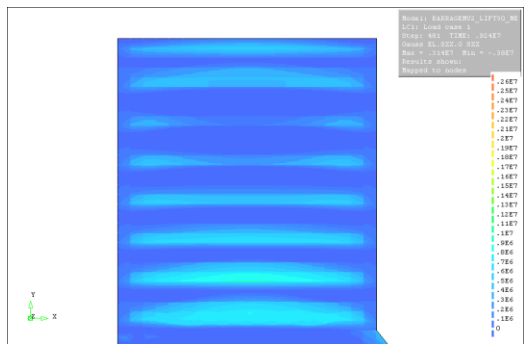


Fig.A5.21- Tensões em x após a betonagem da camada final para t=480h.

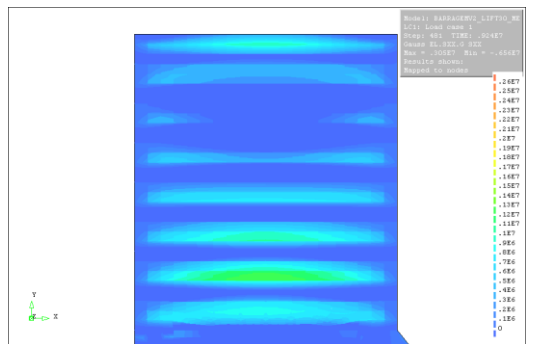
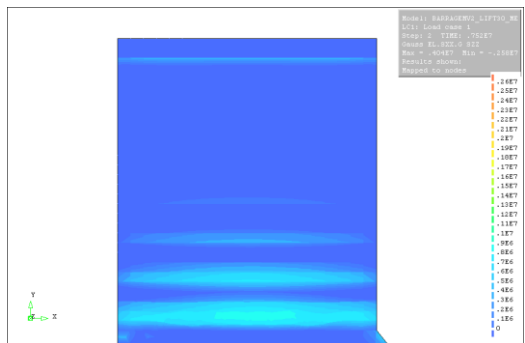
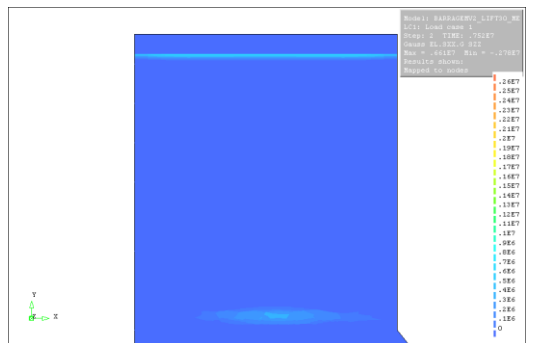


Fig.A5.22- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=1h.

Evolução das tensões em z para dpl1:



Evolução das tensões z para dpl2:



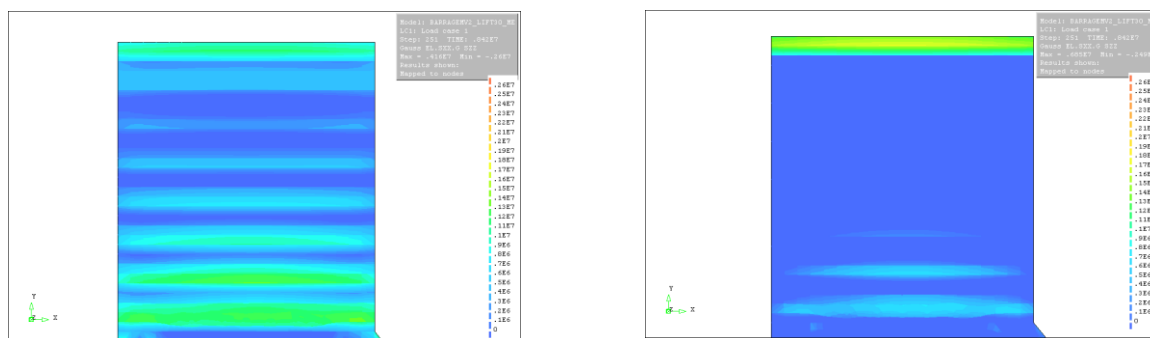


Fig.A5.23- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=250h.

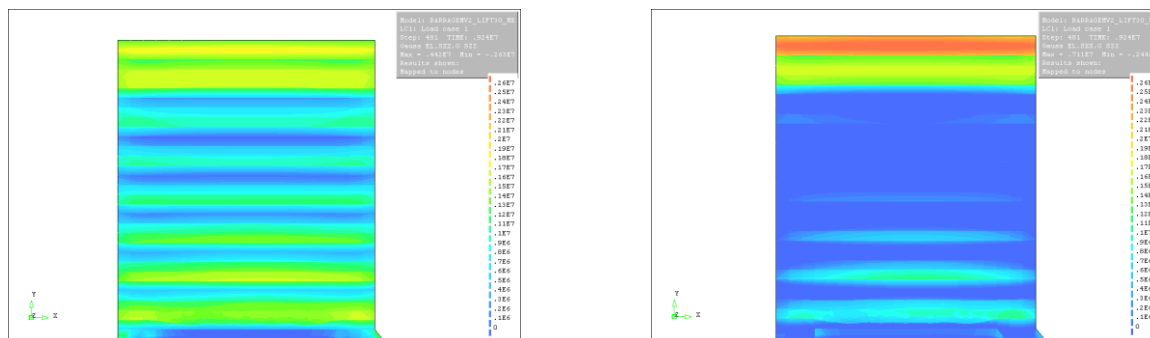


Fig.A5.24- Tensões em z após a betonagem da camada final para t=480h.

A.6.MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO COROAMENTO DA BARRAGEM

1ª CENÁRIO: Zona interior e superfície

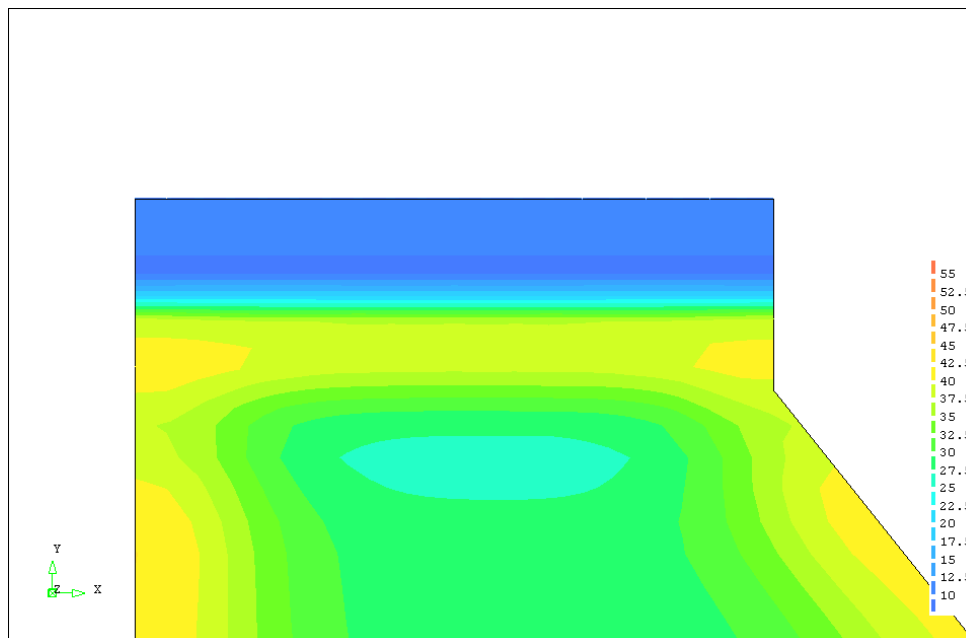


Fig.A6.1- Temperaturas no betão após betonagem da camada 24.

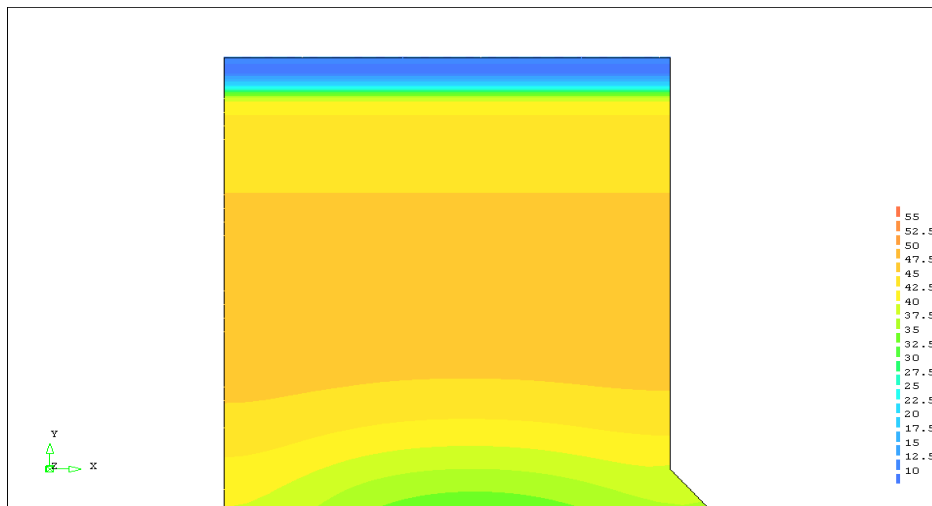


Fig.A6.2- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=1h$.

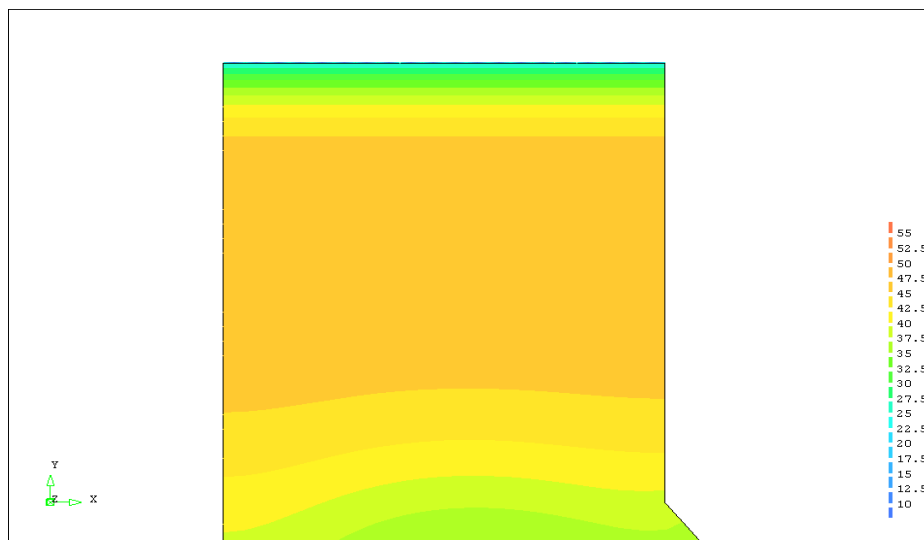


Fig.A6.3- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=250h$.

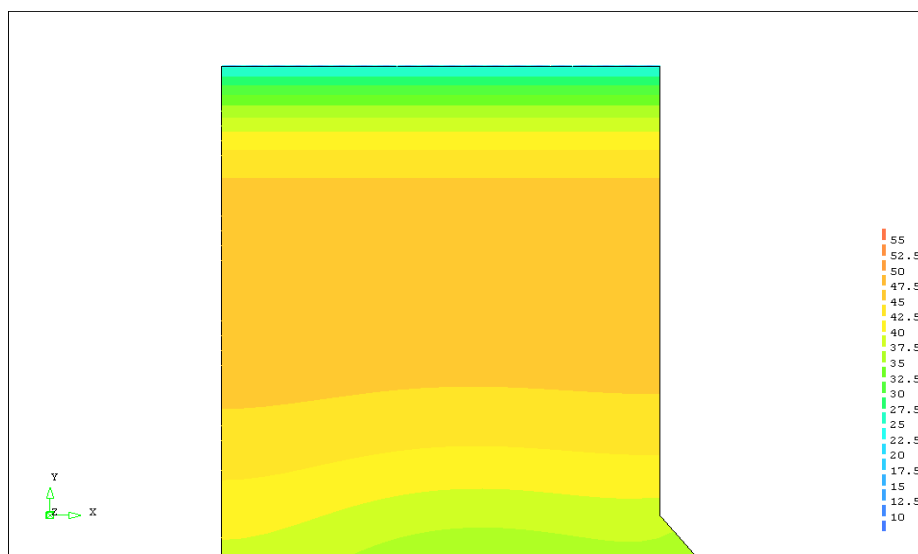


Fig.A6.4- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=480h$.

2º CENÁRIO: Zona interior e superfície

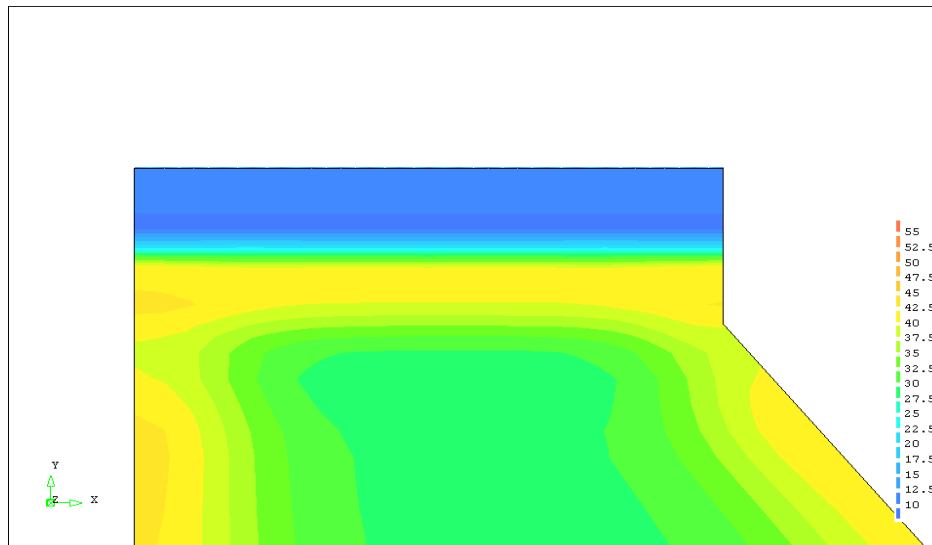


Fig.A6.5- Temperaturas no betão após betonagem da camada 24.

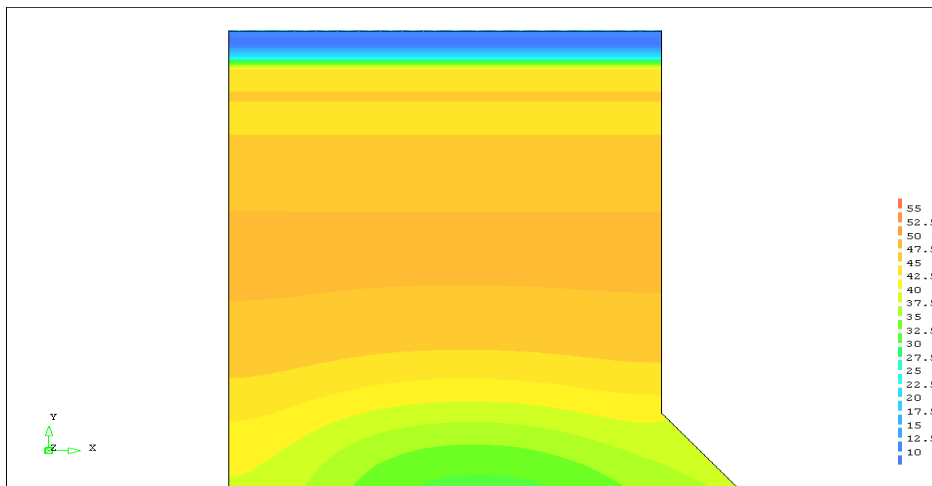


Fig.A6.6- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para t=1h.

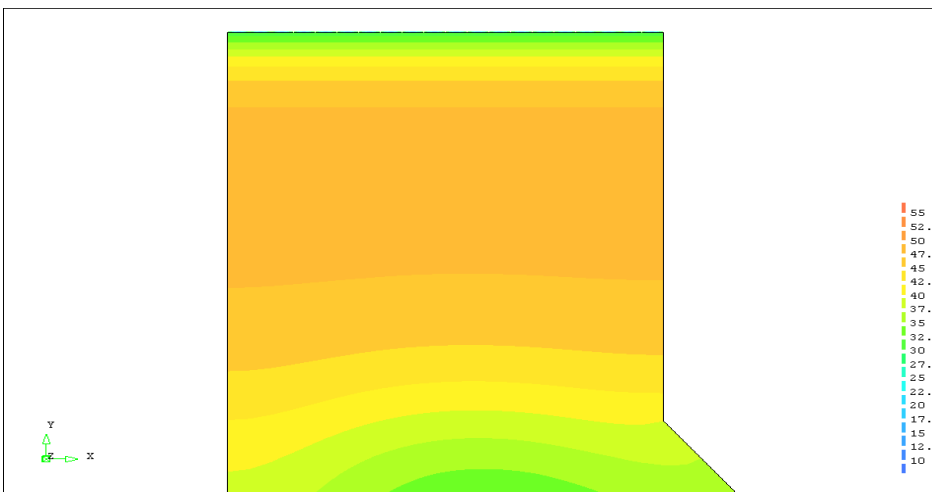


Fig.A6.7- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para t=250h.

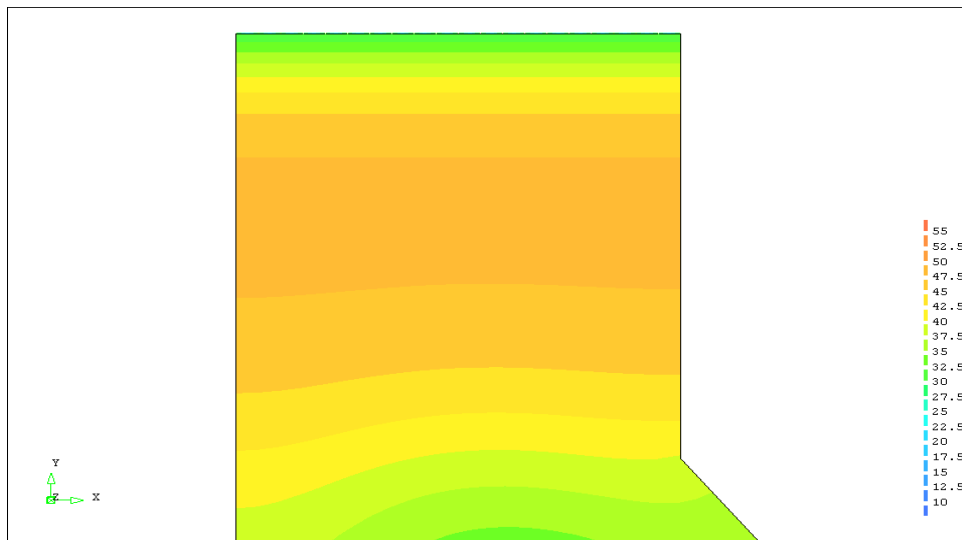


Fig.A6.8- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=480h$.

3º CENÁRIO: Zona interior e superfície

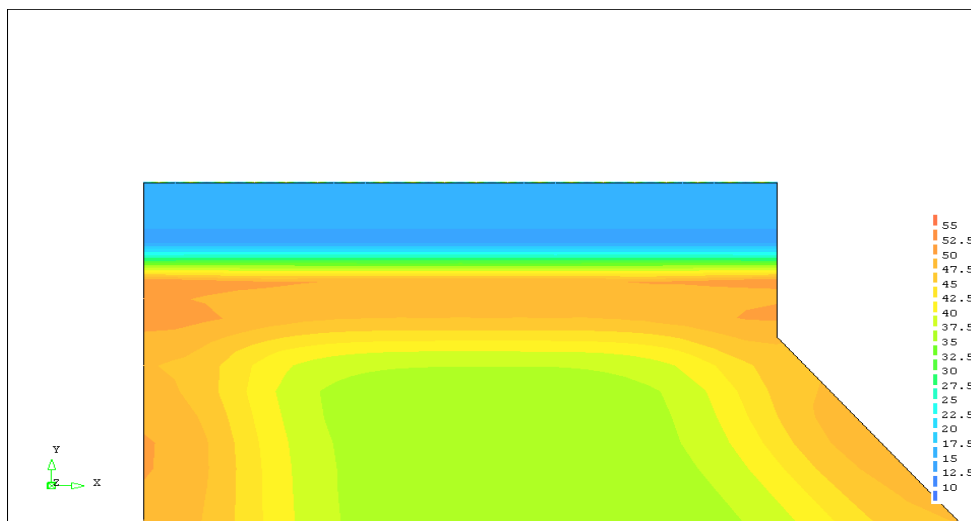


Fig.A6.9- Temperaturas no betão após betonagem da camada 24.

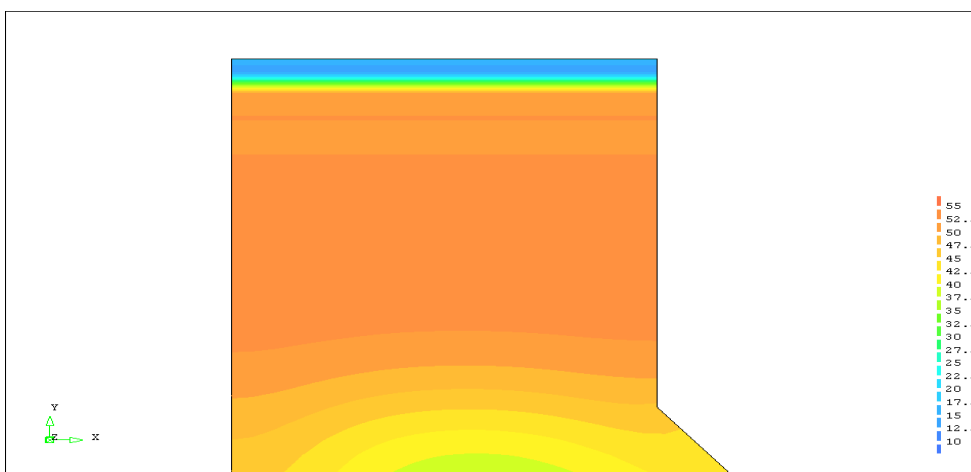


Fig.A6.10- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=1h$.

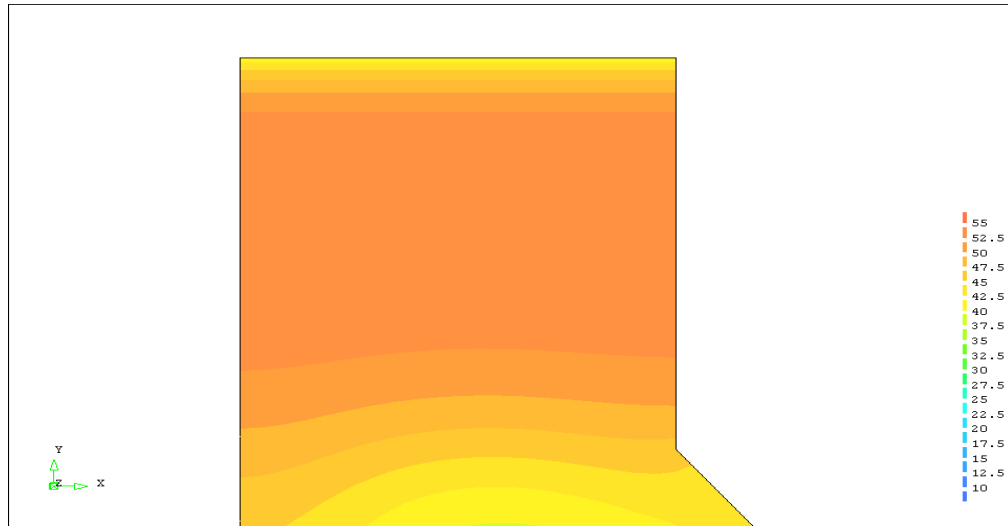


Fig.A6.11- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=250h$.

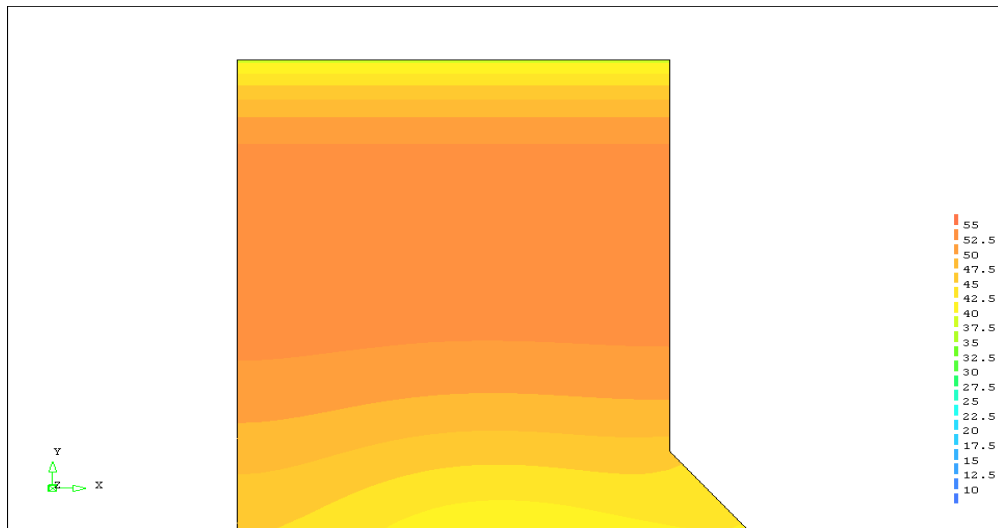


Fig.A6.12- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=480h$.

4º CENÁRIO: Zona interior e superfície

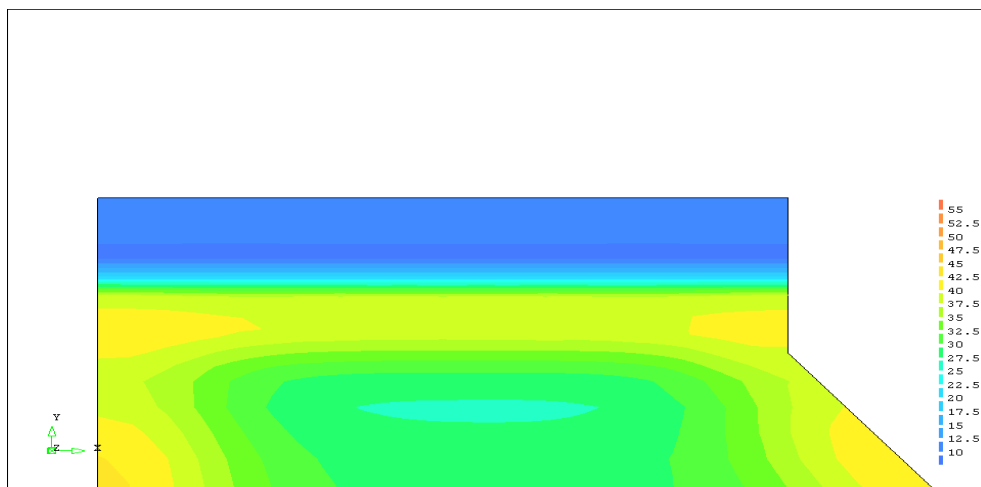


Fig.A6.13- Temperaturas no betão após betonagem da camada 24.

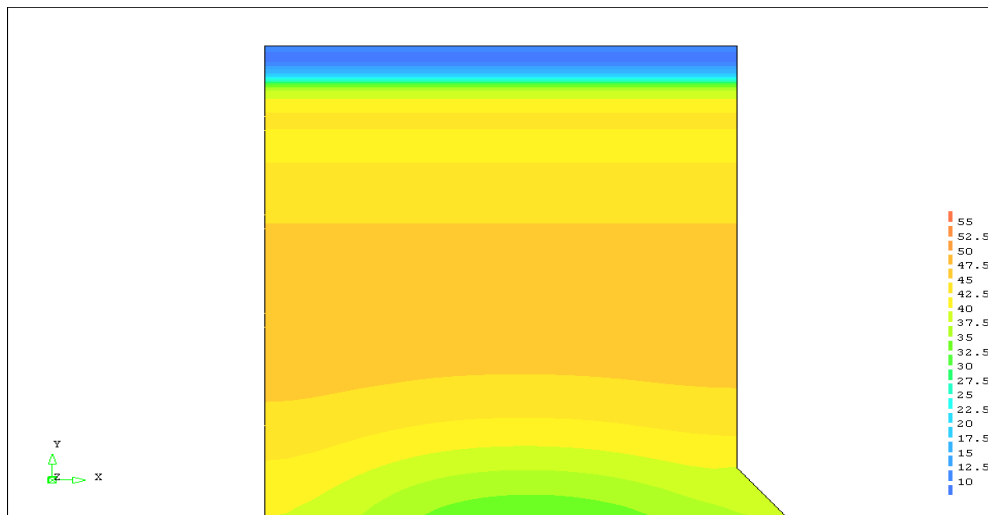


Fig.A6.14- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=1h$.

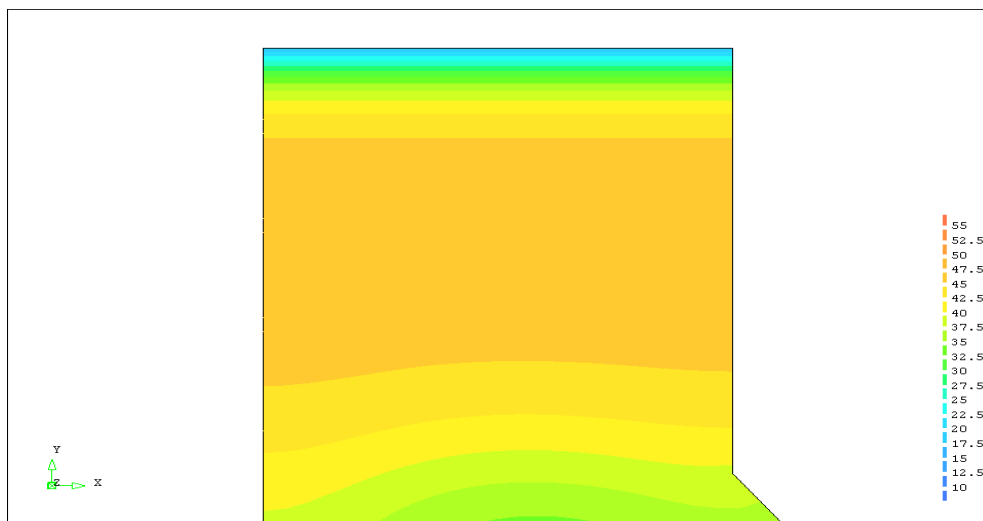


Fig.A6.15- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=250h$.

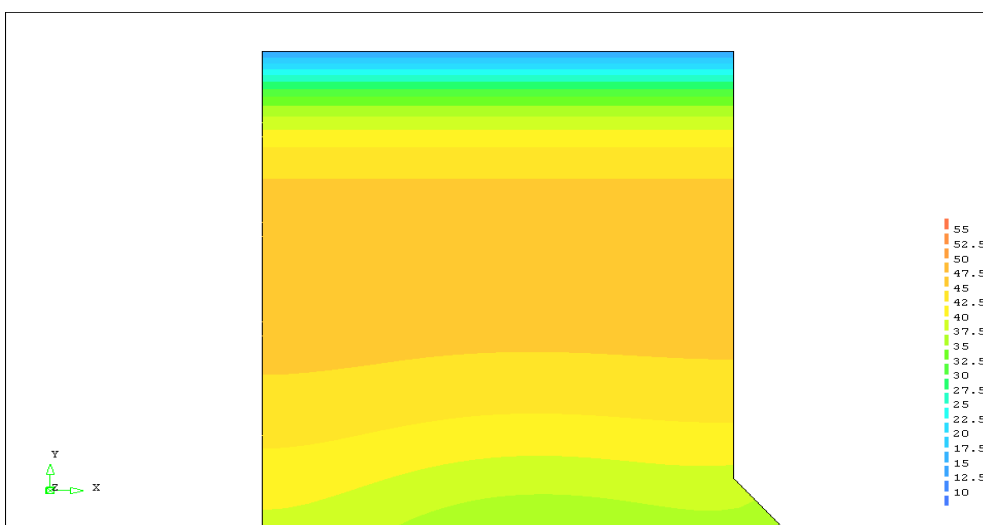


Fig.A6.16- Temperaturas no betão após betonagem da camada 30 para $t=480h$.

A.7. MAPA DA EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS E TENSÕES NA BARRAGEM NO FINAL DO FASEAMENTO CONSTRUTIVO PARA OS 3 CENÁRIOS PRINCIPAIS

INÍCIO DA BETONAGEM NO INVERNO

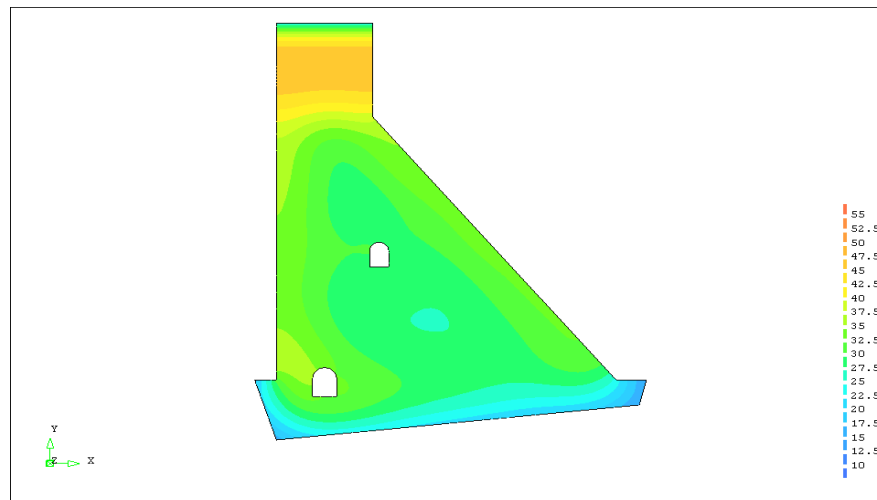


Fig.A7.1- Temperaturas no final da construção.

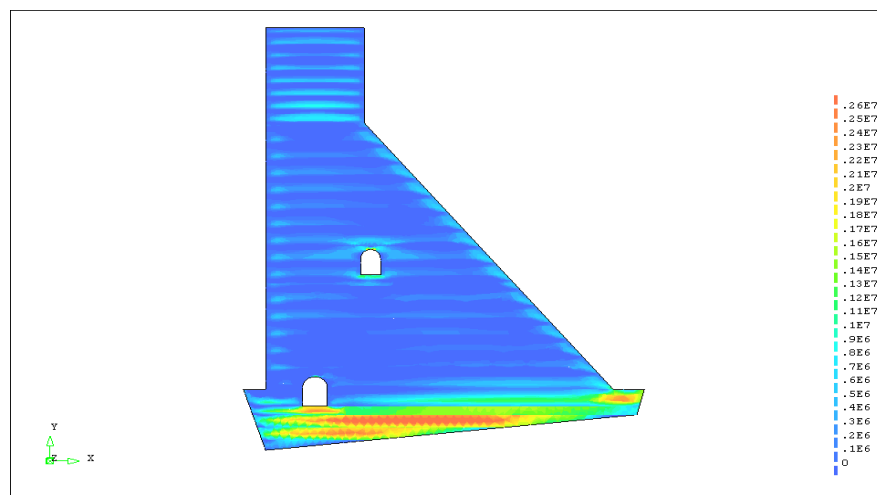


Fig.A7.2- Tensões em x no final da construção para dpl1.

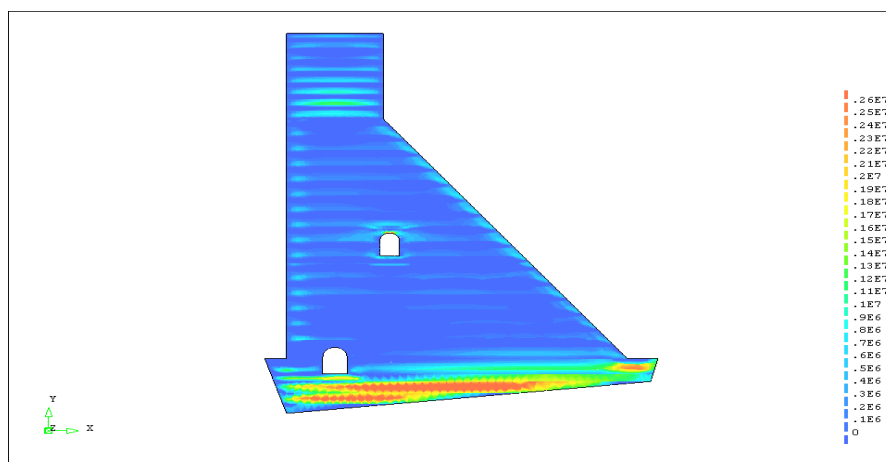


Fig.A7.3- Tensões em x no final da construção para dpl2.

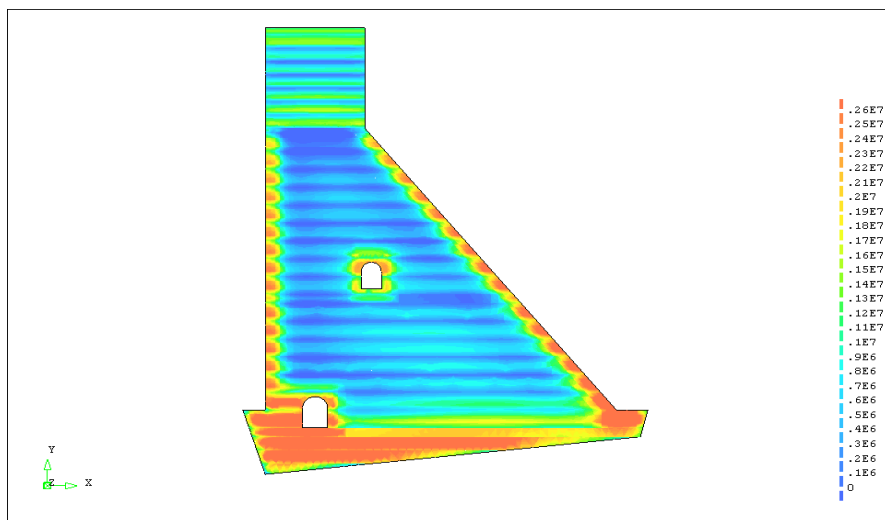


Fig.A7.4- Tensões em z no final da construção para dpl1.

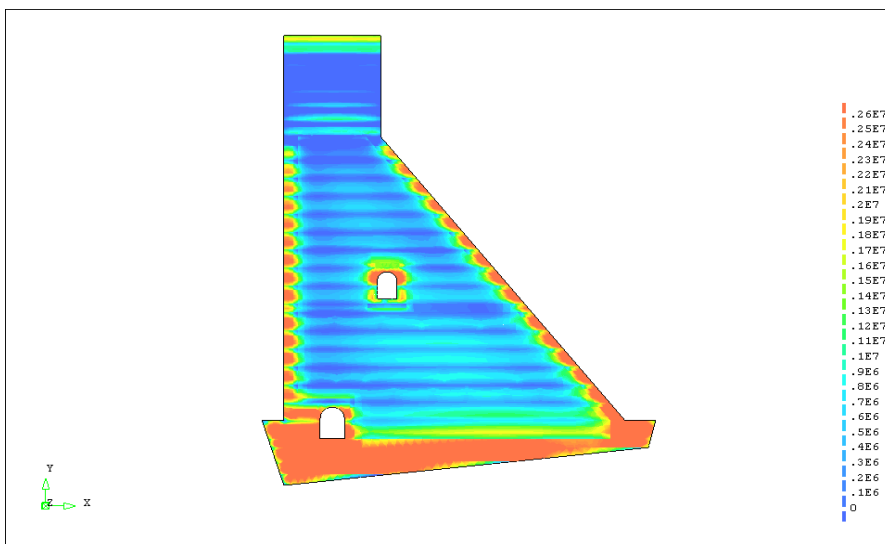


Fig.A7.5- Tensões em z no final da construção para dpl2.

INÍCIO DA BETONAGEM NA PRIMAVERA

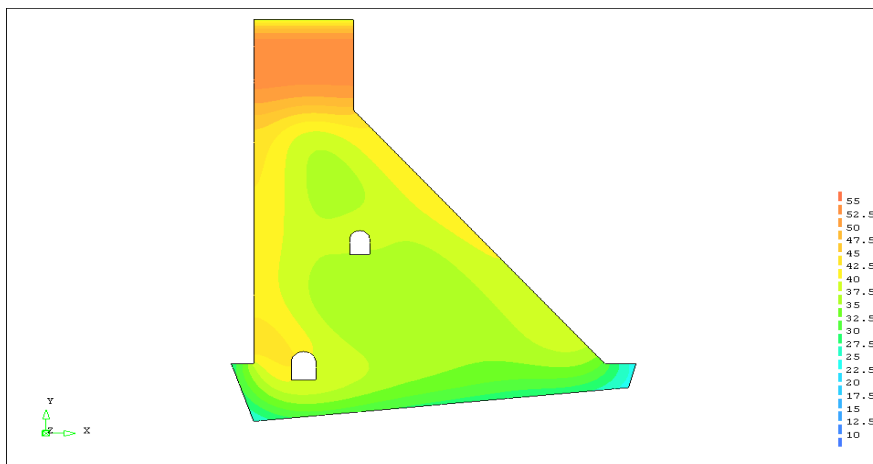


Fig.A7.6- Temperaturas no final da construção.

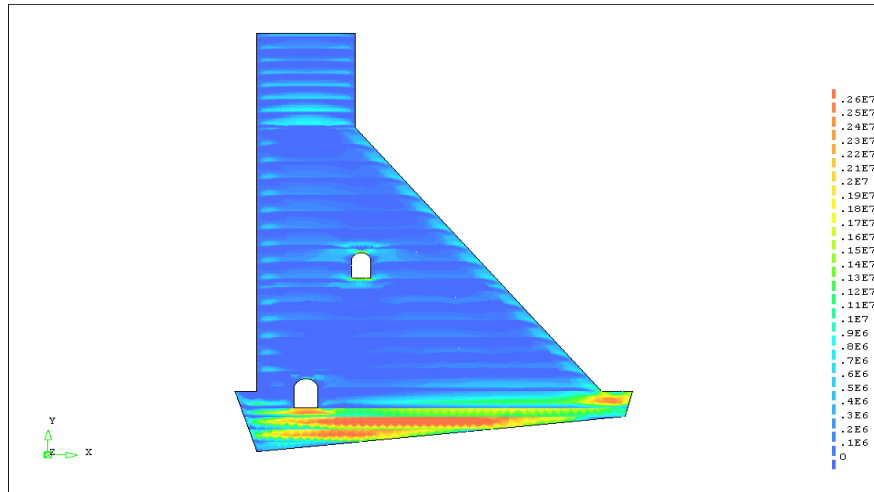


Fig.A7.7- Tensões em x no final da construção para dpl1.

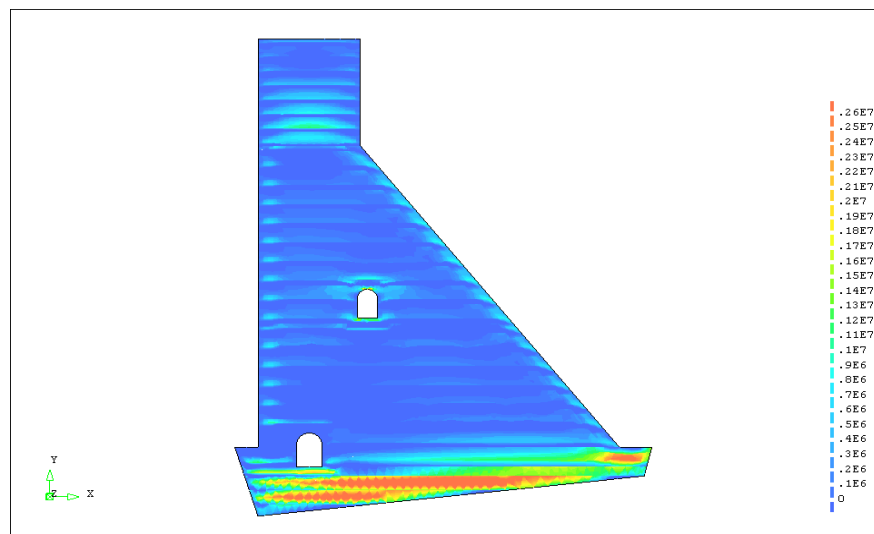


Fig.A7.8- Tensões em x no final da construção para dpl2.

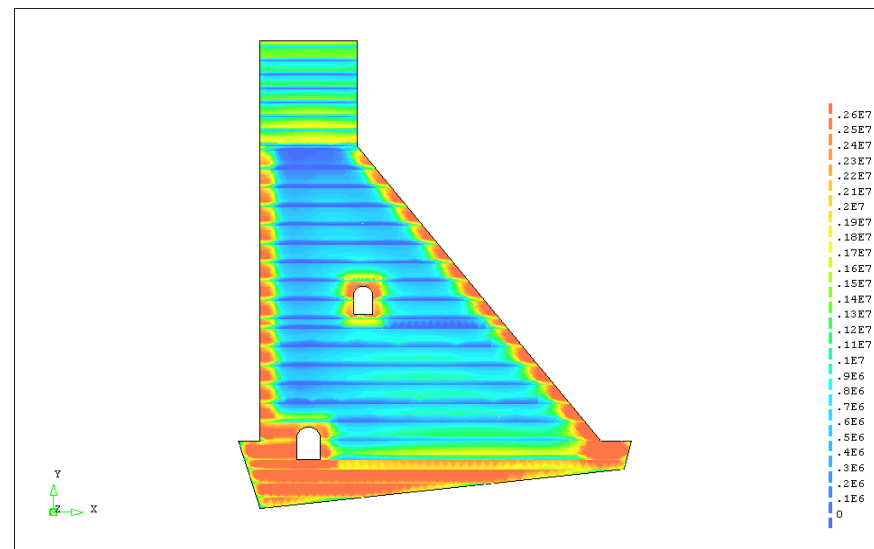


Fig.A7.9- Tensões em z no final da construção para dpl1.

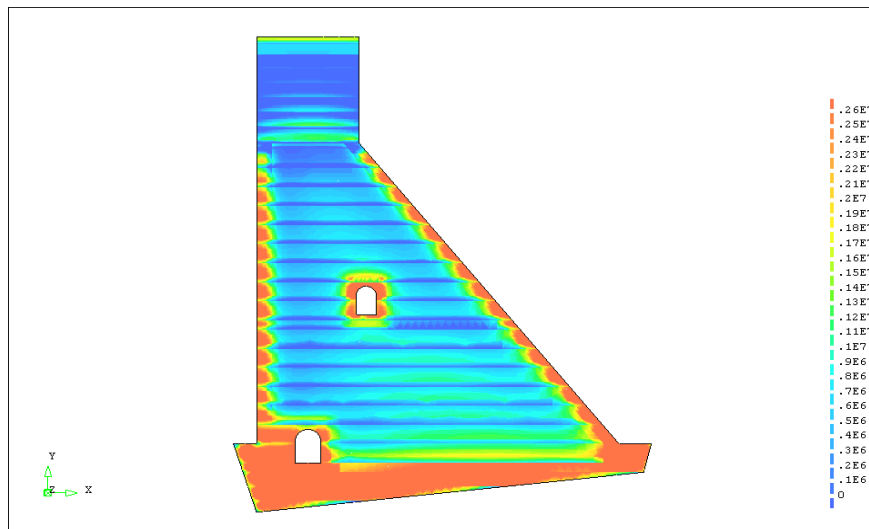


Fig.A7.10- Tensões em z no final da construção para dpl2.

INÍCIO DA BETONAGEM NO OUTONO

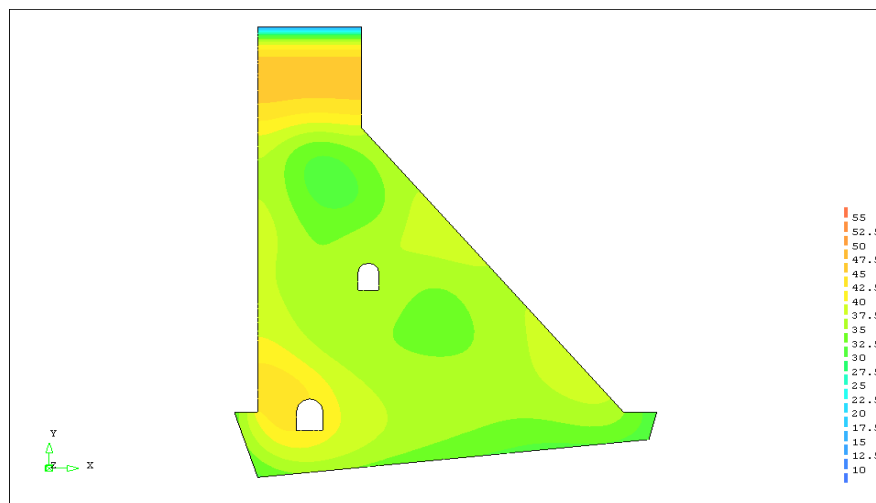


Fig.A7.11- Temperaturas no final da construção.

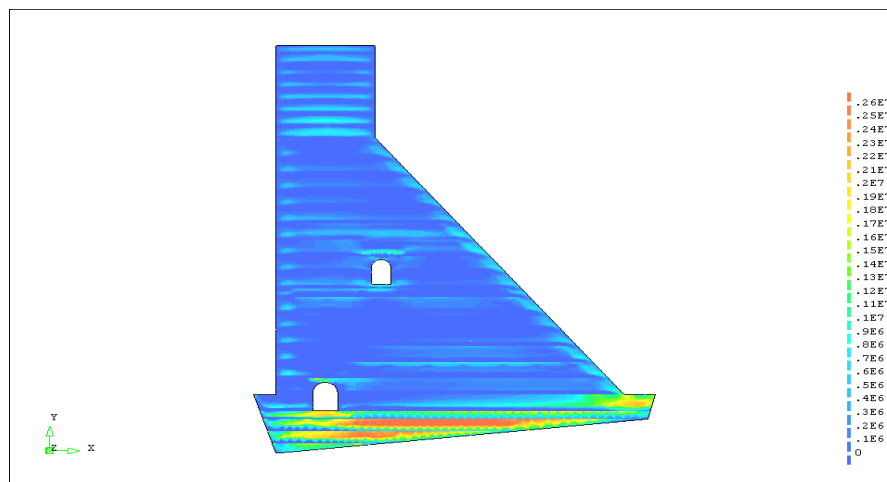


Fig.A7.12- Tensões em x no final da construção para dpl1.

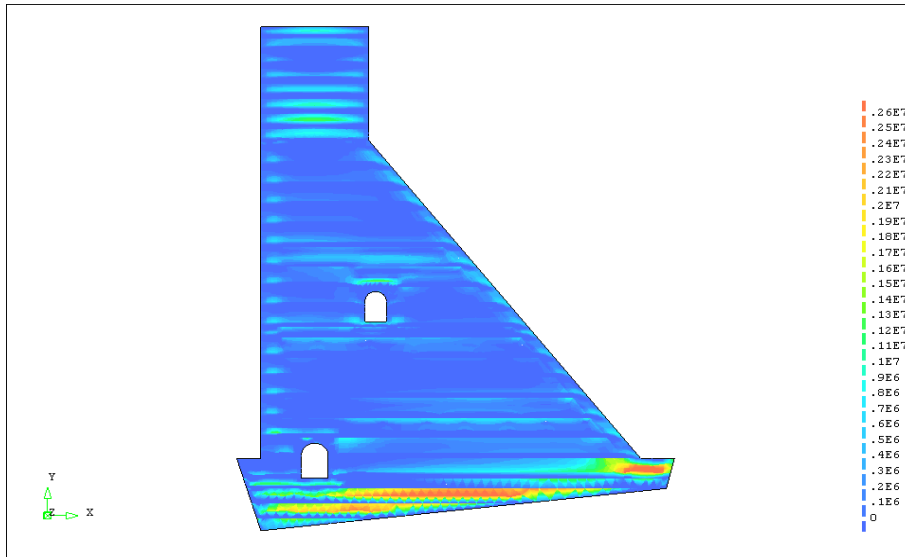


Fig.A7.13- Tensões em x no final da construção para dpl2.

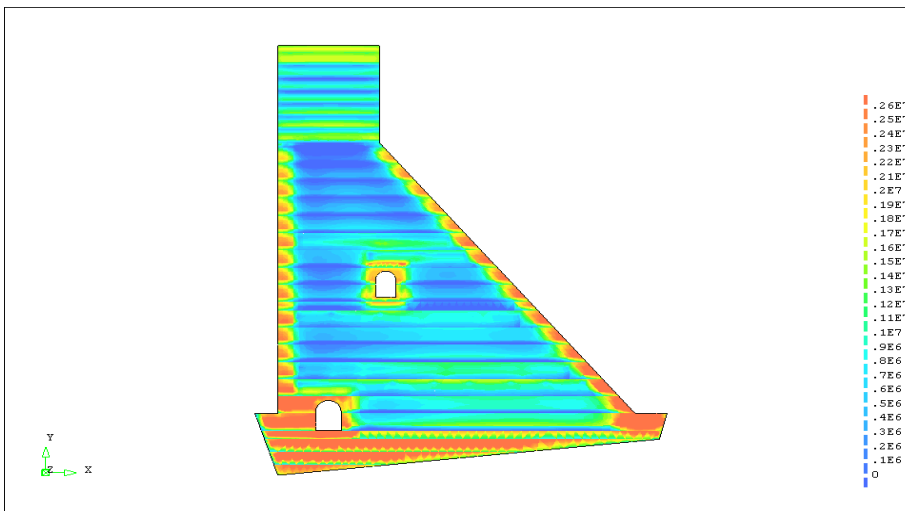


Fig.A7.14- Tensões em z no final da construção para dpl1.

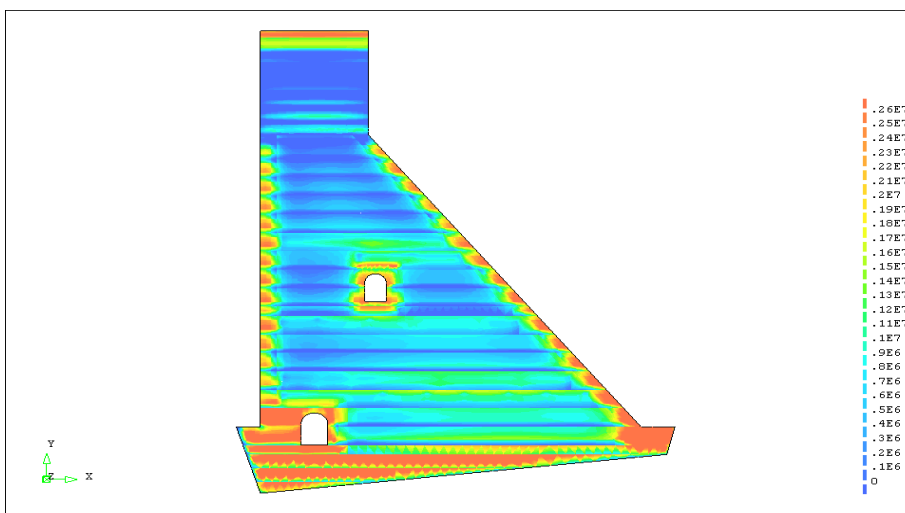


Fig.A7.15- Tensões em z no final da construção para dpl1.

B. GRÁFICOS DAS EVOLUÇÕES DAS TENSÕES NA BASE DA BARRAGEM EM CASO DE ATRASO NA BETONAGEM

1ª CENÁRIO

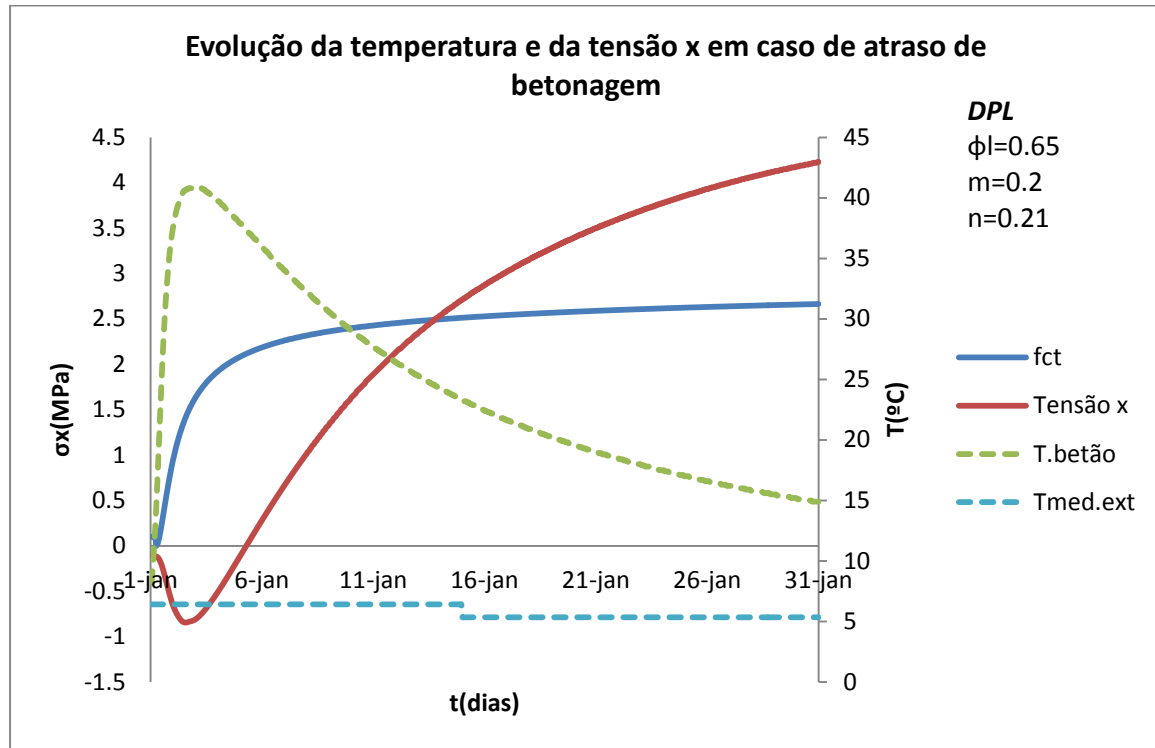


Fig. B.1.-Evolução da temperatura e de σ_x .

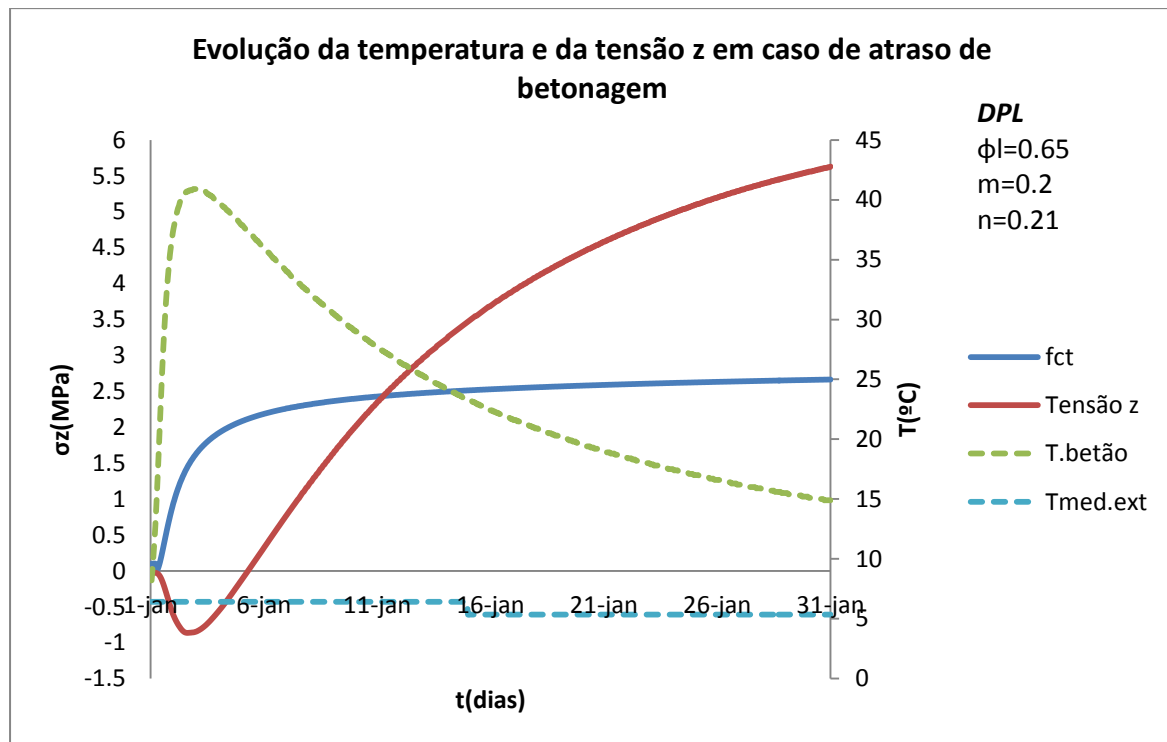
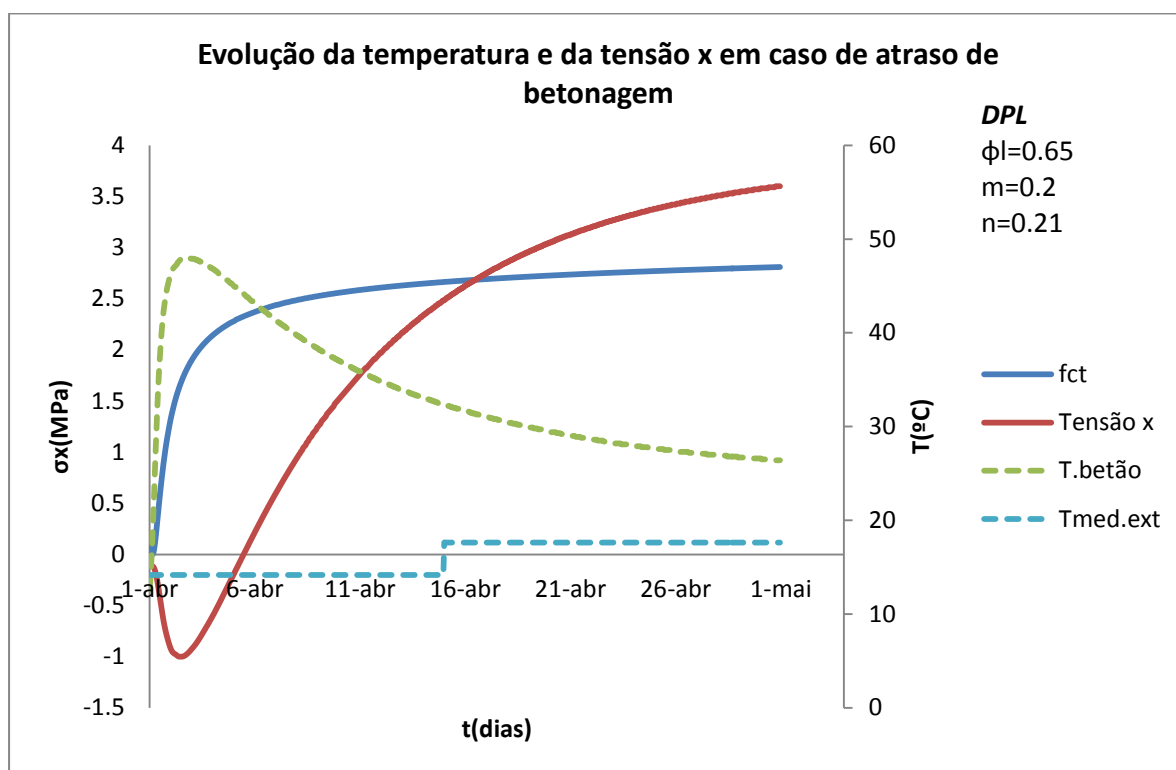
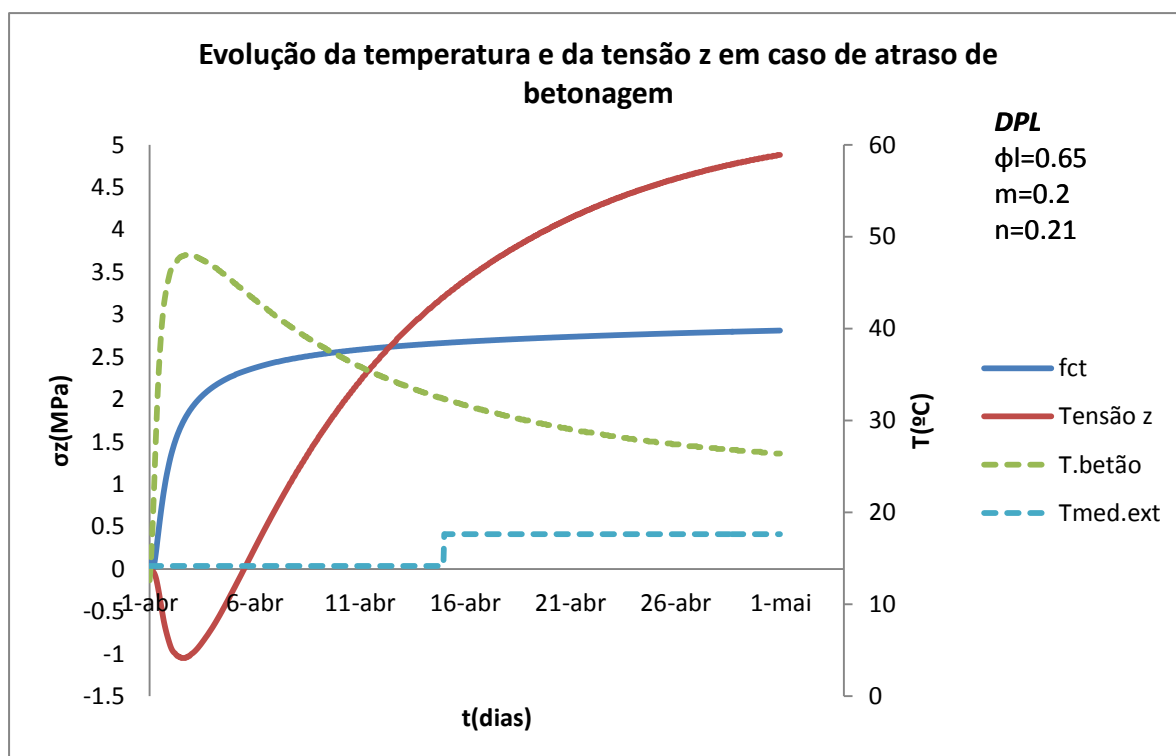


Fig. B.2.-Evolução da temperatura e de σ_z .

2º CENÁRIO

Fig. B.3.-Evolução da temperatura e de σ_x .Fig. B.4.-Evolução da temperatura e de σ_z .

3º CENÁRIO:

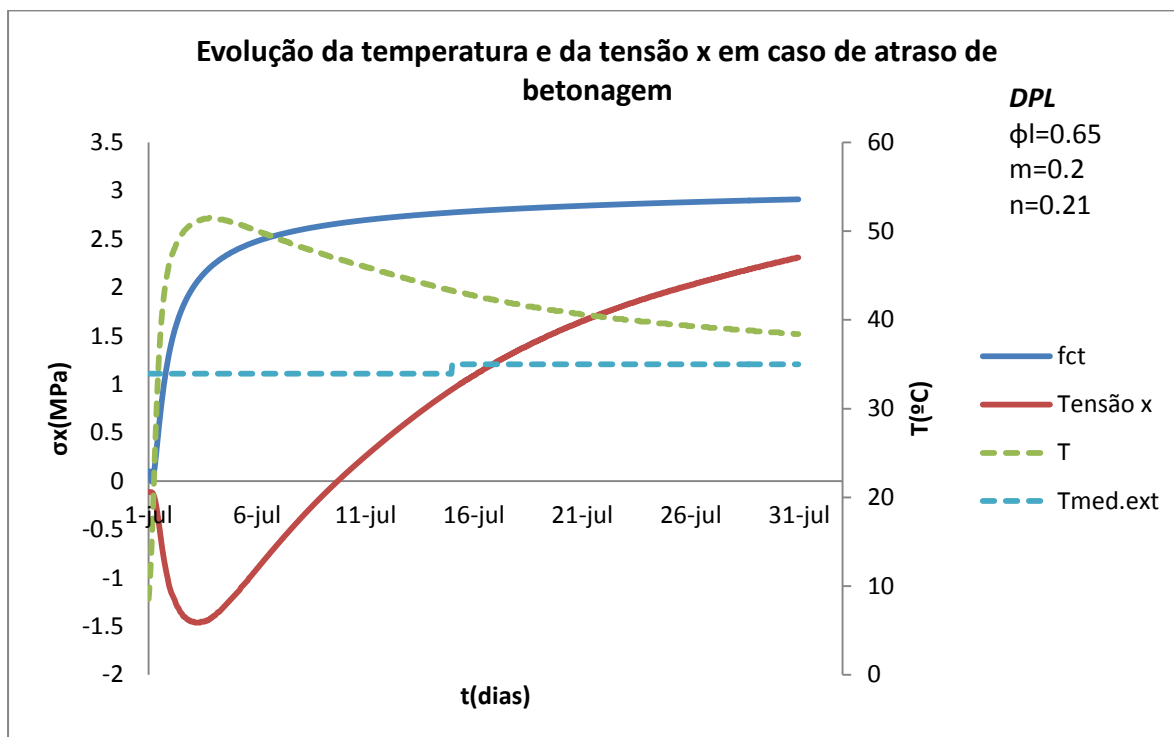


Fig. B.5.-Evolução da temperatura e de σ_x .

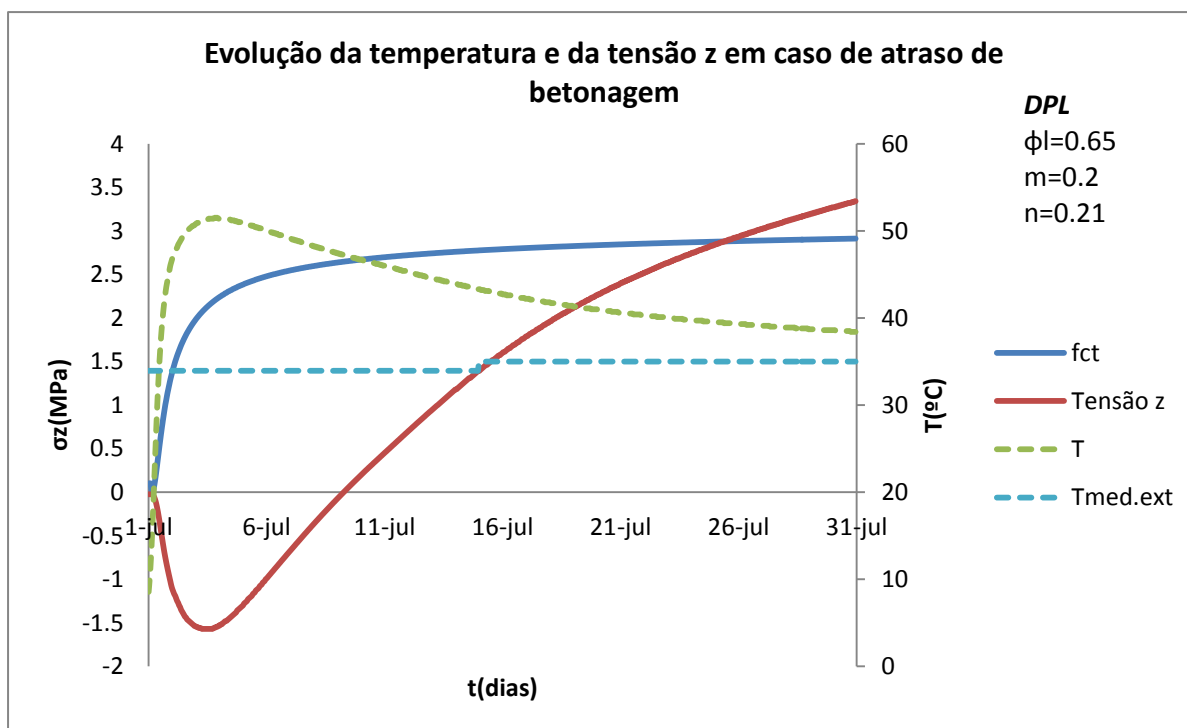


Fig. B.6.-Evolução da temperatura e de σ_z .

4º CENÁRIO

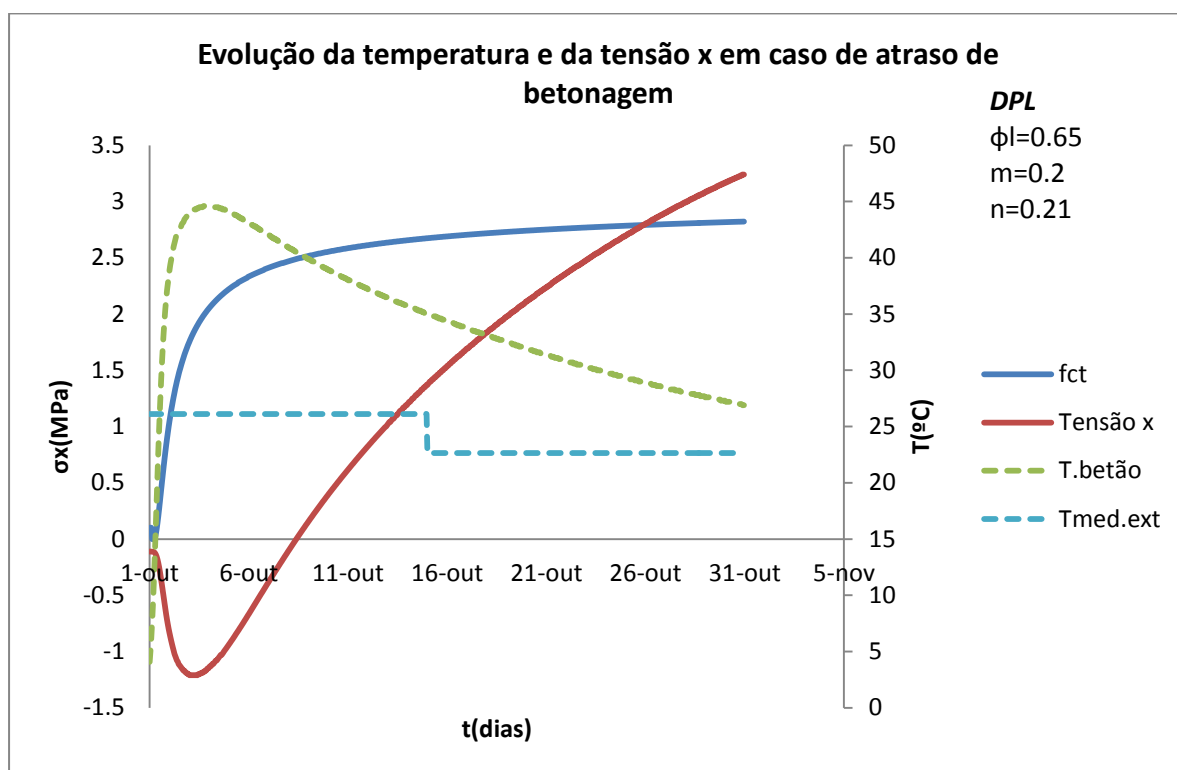


Fig. B.7.-Evolução da temperatura e de σ_x .

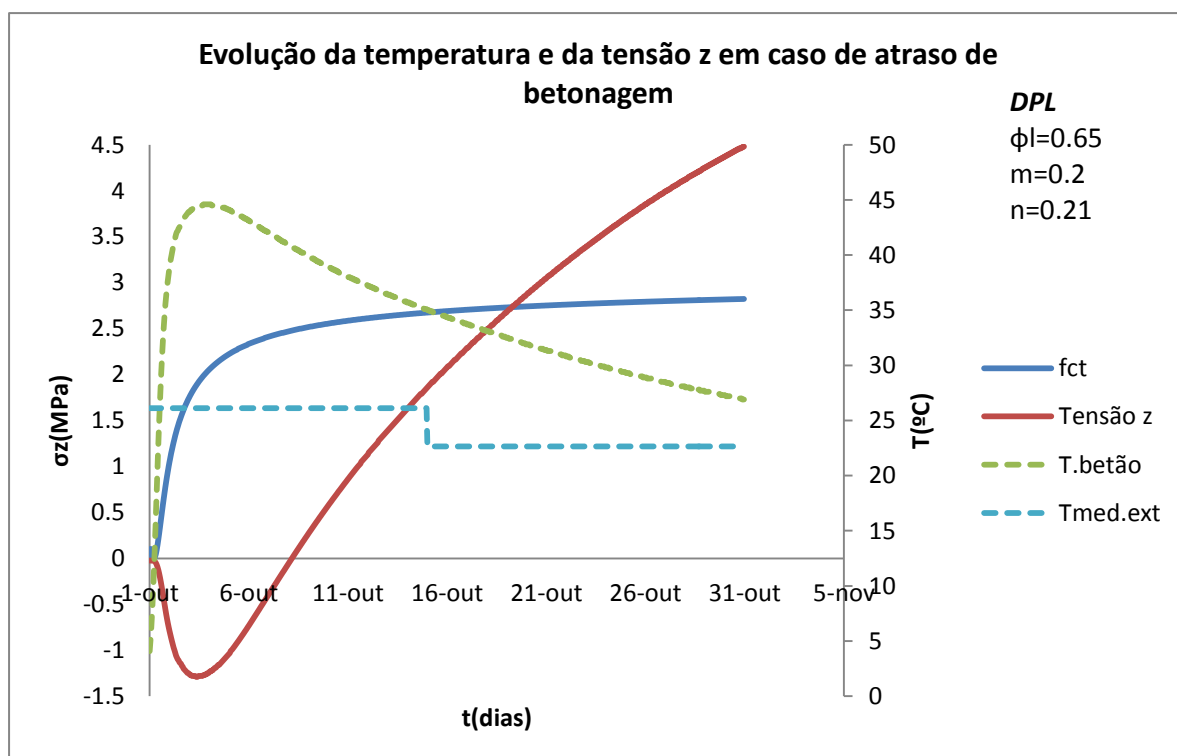


Fig. B.8.-Evolução da temperatura e de σ_z .